

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Estudio del haz de neutrones rápidos producidos
por la fuente de neutrones Hispalis en el Centro
Nacional de Aceleradores (CNA)**

MEMORIA

Autora: Clara de Asís Torres Escubós
Director: Ariel Esteban Tarifeño Saldivia
Ponente: Francisco Calviño Tavares
Convocatoria: Septiembre 2017 - Enero 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El Centro Nacional de Aceleradores (CNA) es un centro mixto de la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que tiene como misión el desarrollo de la investigación en aceleradores de partículas y sus múltiples aplicaciones. El CNA, reconocido como Instalación Científico-Técnica Singular (ICTS) es un centro abierto para que la comunidad científica y tecnológica nacional e internacional pueda desarrollar investigaciones utilizando sus instalaciones.

Entre las seis grandes instalaciones que se hallan en el centro, se encuentra el acelerador Tándem de 3MV, una herramienta potente y versátil para la Instrumentación Nuclear. En este acelerador se instaló HISPANOS (HISPAlis NeutrOn Source), que será un referente en España como fuente de neutrones.

Con tal de evaluar dicha instalación para la producción de neutrones, del 4 al 7 de julio del año 2016 se realizó una primera campaña de caracterización del haz de neutrones rápidos producidos por reacciones de fusión $D(d,n)^3\text{He}$. En ésta, participaron diferentes grupos de investigación, entre ellos, el grupo de Física Nuclear experimental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Con esta primera campaña de mediciones se buscaba que la comunidad de usuarios de HISPANOS se familiarizara con el uso de la instalación de neutrones, un paso necesario para la planificación y realización de futuros experimentos.

En el presente trabajo se realiza un análisis de los datos de esas medidas de producción de neutrones, obtenidas usando detectores de ^3He . Para ello, se han desarrollado rutinas para el procesamiento de dichos datos. También se hacen comparaciones con estimaciones teóricas de producción de neutrones en la instalación. Finalmente, se realizan recomendaciones para mediciones futuras.

Índice

RESUMEN	I
ÍNDICE	III
GLOSARIO	1
1. ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos	3
2. INTRODUCCIÓN	4
2.1. Descripción de la instalación: CNA e Hispalis	4
2.2. Primera campaña de caracterización de la línea de producción de neutrones rápidos en el CNA	5
2.3. Detectores de neutrones basados en tubos de ^3He moderados	6
2.4. Montaje experimental de la línea de producción de neutrones en el CNA	7
2.4.1. Configuración del acelerador	7
2.4.2. Blanco de producción de neutrones	7
2.4.2.1. Características del blanco	8
2.5. Monitores de neutrones	8
2.5.1. Descripción de los detectores	8
2.5.2. Configuración de los detectores	9
2.5.3. Uso del cono de sombra	10
2.6. Sistema de adquisición de datos digital (DAQ)	10
2.7. ROOT: Entorno de análisis de datos	11
2.8. Tareas a realizar y organización del trabajo	12
3. MARCO TEÓRICO PARA LA MEDICIÓN DE LAS TASAS DE CONTEO DE NEUTRONES	13
3.1. Medición experimental de las tasas de conteo	13
3.2. ISO 8529-2. Reference neutron radiations	15
3.3. Análisis de datos	15
3.3.1. Nomenclatura	15
3.3.2. Tiempo de conteo	15
3.3.3. Tasas de conteo	15
3.3.4. Fracción de conteo debida a la dispersión	16
3.3.5. Efectos de tiempo muerto	16

3.4.	Propagación de incertezas	17
3.4.1.	Normalizaciones	17
3.4.1.1.	Nmon	17
3.4.1.2.	Corriente	18
3.4.2.	Incertezas debidas a las diferencias de tasas, para ambas normalizaciones	18
4.	ORGANIZACIÓN DE LOS FICHEROS EXPERIMENTALES Y CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS A ANALIZAR	19
4.1.	Rutina de análisis. Tablas de datos online	21
4.2.	Calibración de los detectores de neutrones	24
4.3.	Evaluación de los efectos de tiempo muerto	25
4.4.	Corriente del haz	26
4.5.	Tablas de datos offline	27
5.	ESTIMACIONES TEÓRICAS DE PRODUCCIÓN DE NEUTRONES	28
5.1.	Respuesta de los detectores de neutrones	28
5.1.1.	Caracterización de la simulación	28
5.1.1.1.	Nomenclatura	28
5.1.1.2.	Ecuaciones	29
5.2.	NeuSDesc	30
5.3.	Tasas de conteo teóricas	33
6.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS	35
6.1.	Caracterización del fondo de neutrones	35
6.2.	Medidas de producción en función de la distancia al blanco	36
6.3.	Medidas de producción angular	37
6.4.	Efectos de dispersión en la medida del Amon	37
6.5.	Tasa de conteo del Nmon	38
6.6.	Medidas de producción con normalización a la tasa del Nmon	39
6.6.1.	Tasas de conteo normalizadas en función de la distancia al blanco	39
6.6.2.	Tasas de conteo normalizadas en función de la posición angular	39
6.6.3.	Estimación de la fracción de conteo debida a la dispersión en el detector Nmon	40
6.6.4.	Tasas de conteo normalizadas en función de la distancia al blanco, corregidas a los efectos de dispersión y comparadas con estimaciones teóricas	41
6.6.5.	Tasas de conteo normalizadas en función de la posición angular, corregidas a los efectos de dispersión y comparadas con estimaciones teóricas	42
6.7.	Medidas de producción con normalización a la corriente	43

6.7.1.	Tasas de conteo del Nmon corregidas a los efectos de dispersión	43
6.7.2.	Medidas de producción en el Amon y comparación con las simuladas.....	46
7.	PLANIFICACIÓN, COSTE E IMPACTO DEL PROYECTO	48
7.1.1.	Planificación.....	48
7.1.2.	Coste	49
7.1.3.	Impacto medioambiental.....	49
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
	AGRADECIMIENTOS	52
	BIBLIOGRAFÍA	53
	Referencias bibliográficas	53
	Bibliografía complementaria	54
	ANEXO	55
	Anexo 1. Atenuación del aire	55
	Anexo 2. Runbook realizado en Excel	57
	Anexo 3. Organización de los ficheros experimentales	60
	Anexo 4. Script ROOT magnitudes de interés online	61
	Anexo 5. Histogramas obtenidos a partir del script anterior	67
	Anexo 6. Script obtención corriente experimental.....	68
	Anexo 7. Código LongCounter	69
	Anexo 8. Tablas Respuesta Amon y Nmon	71

Glosario

Alrr: Área irradiada del detector (cm^2)

Amon: Monitor de neutrones

AngSD: Ángulo sólido del detector (sr)

AngSF: Ángulo sólido de la fuente (sr)

CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

CNA: Centro Nacional de Aceleradores

CN: Cuentas de neutrones

CP: Cuentas de reloj en el canal del detector

CSN: Consejo de Seguridad Nuclear

D: Distancia del detector a la fuente (cm)

DAQ: Sistema de adquisición de datos

fcal: factor de calibración

F(E): Fluencia promediada en el detector en función de la energía

FPGA: Matriz de puertas programables (del inglés Field Programmable Gate Array)

freloj: Frecuencia del pulsador

I_{eff}: Corriente efectiva en el blanco (μA)

I_{exp}: Corriente medida en ficheros experimentales (μA)

IFIC: Instituto de Física Corpuscular

UPC: Universidad Politécnica de Cataluña

US: Universidad de Sevilla

Mback: Tasa de conteo debida al fondo de radiación natural

M_{exp}: Tasa de conteo experimental

M_{fuelle}: Tasa de conteo de la fuente

M_{meta}: Tasa de conteo neta

M_s: Tasa de conteo teórica, encontrada a partir de simulaciones

M_{scat}: Tasa de conteo debida a la dispersión

M_T: Tasa de conteo total

N_{Ev}: Número de eventos simulados

N_{EvIrr}: Número de eventos en el área irradiada del detector

N_{mon}: Monitor de neutrones fijo

P: Cuentas de pulsador

R: Radio (cm)

R(E): Respuesta del detector en función de la energía

Resp: Respuesta (cm²)

1. Alcance del proyecto

1.1. Objetivo general

El objetivo principal de este proyecto consiste en el análisis y la evaluación de las medidas de producción de neutrones rápidos en la fuente de neutrones Hispalis del Centro Nacional de Aceleradores (CNA) en Sevilla.

1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- La organización de la base de datos presente en los ficheros experimentales.
- El procesamiento de los datos experimentales.
- La creación de rutinas de automatización para dicho procesamiento y para el análisis de los datos.
- El cálculo de la respuesta de los detectores y de las tasas de producción en reacciones de fusión $D(d,n)^3\text{He}$.
- La obtención de las tasas de conteo netas en los detectores de neutrones.
- Comparación de las medidas de producción de neutrones con los modelos teóricos.
- Evaluación experimental de las características de la instalación actual en el CNA para la producción de neutrones.
- Validar el montaje y el método experimental que se usaron para realizar las medidas de la producción de neutrones.
- Proponer mejoras para futuras campañas.

2. Introducción

2.1. Descripción de la instalación: CNA e Hispalis

La fuente de neutrones Hispalis es una nueva línea experimental creada en el Centro Nacional de Aceleradores en Sevilla [CNA01], una de las instalaciones reconocidas como "Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS)" por las entidades de ciencia y tecnología españolas.

Hispanos (Hispalis Neutron Source) hace uso del acelerador Tándem Van de Graaff de 3 MV. Entre las fuentes de iones disponibles, para la producción de neutrones, se utiliza la fuente SNICS-2, donde los iones se aceleran. A continuación, un imán de análisis de 90° permite separar las especies iónicas y los estados de carga, perdiendo alrededor del 30-40% de la corriente en el proceso. Por último, el haz puede viajar a través de cualquiera de las 7 líneas de haz que tiene disponibles a través de un imán selector. La línea Física Nuclear Básica (FNB), a 30 grados, es la que se usa para la producción del haz de neutrones continuo a caracterizar. (Ver Figura 1).

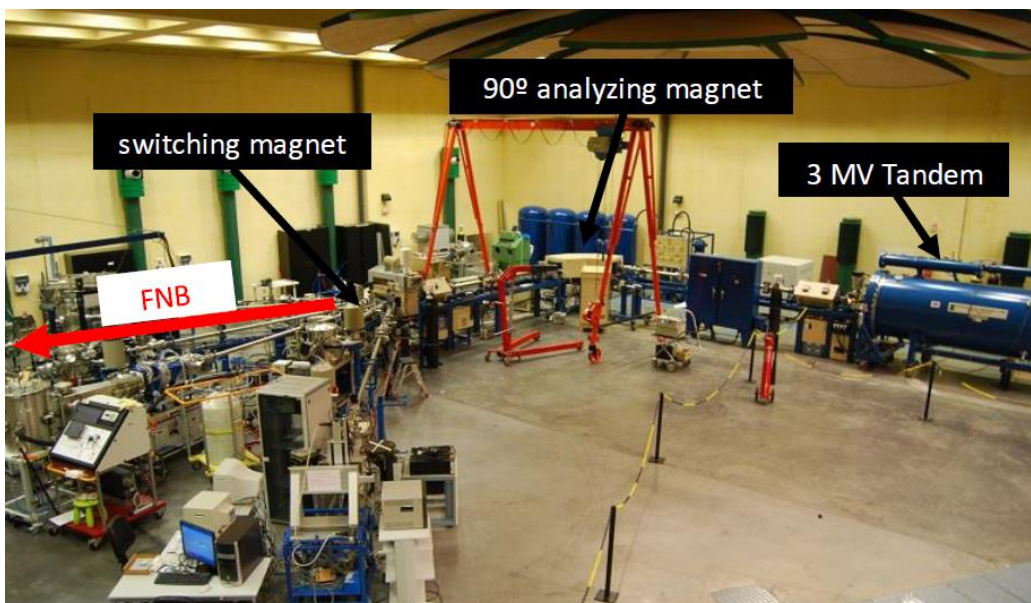
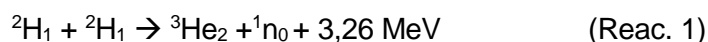


Figura 1. Vista general de la sala experimental Tándem 3MV que muestra el acelerador y los imanes de análisis y conmutación.

2.2. Primera campaña de caracterización de la línea de producción de neutrones rápidos en el CNA

La primera campaña de caracterización del haz de neutrones rápidos tuvo lugar del 4 al 7 de julio de 2016, con la participación de grupos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), la Universidad de Sevilla (US) y el CNA. Durante esta primera campaña el grupo de la UPC realizó medidas de producción de neutrones usando contadores proporcionales moderados y el grupo del CIEMAT realizó medidas espectrométricas usando detectores de centelleo. El presente trabajo se centra en el análisis de las medidas de producción de neutrones que me facilitó el grupo de Física Nuclear experimental de la UPC.

Durante esta campaña, el haz de neutrones se produjo mediante reacciones nucleares en un blanco deuterado. El haz de deuterones, una vez incide en el blanco, genera la reacción $D(d,n)^3\text{He}$, también conocida como:



En dicha reacción, a partir de un núcleo de $^2\text{H}_1$, siendo este deuterón el proyectil, resulta un núcleo de $^3\text{He}_2$ y un neutrón como eyectil. Es interesante su utilización en este trabajo ya que es relativamente fácil de usar y no genera radiactividad [MDr02]. También es interesante el uso de esta reacción ya que la energía con la que inciden los deuterones es relativamente pequeña (alrededor de 100 – 300 keV) comparada con la que se produce en la reacción que es de 3,26 MeV. Debido a esto, todos los neutrones producidos tienen prácticamente la misma energía (cerca de 3 MeV).

Existen una serie de programas computacionales que permiten realizar estimaciones teóricas de la producción de neutrones a través de reacciones nucleares en aceleradores, en instalaciones monoenergéticas. Ejemplos de éstos son DROSG-2000 [MDO03], disponible en la página web de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) [IAEA04], NeuSDesc [NEU05] y el código Target de Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) en Alemania [DSB06] [DiS07]. En el presente trabajo (ver Capítulo 5, Sección 2), se hace uso del código NeuSDesc para la realización de estimaciones de las tasas de conteo esperadas en los monitores de neutrones.

2.3. Detectores de neutrones basados en tubos de ^3He moderados

La mayoría de los detectores de neutrones térmicos usan ^3He como gas de detección que sufre la siguiente reacción nuclear:



Los productos de la reacción consisten en dos partículas cargadas: un protón (${}^1\text{H}_1$) y un tritón (${}^3\text{H}_1$) lanzado en direcciones opuestas con una energía cinética combinada de 764 keV. Esta energía cinética se disipa por ionización del gas de recuento proporcional. Dado que la energía cinética neutrónica incidente es muy pequeña (1/40 eV para los neutrones térmicos), los detectores de neutrones térmicos no son particularmente sensibles a las energías de los neutrones. Las partículas cargadas liberadas son atraídas por el alto voltaje del ánodo y liberan electrones. Estos se aceleran hacia los ánodos y, por lo tanto, crean una nube de detección a través de la ionización secundaria (multiplicación de carga).

El pico principal de neutrones se encuentra a 764 keV y se forma como resultado de la absorción total de la energía cinética del tritón y del protón en el gas de detección. Sin embargo, cuando la reacción de detección ocurre cerca de la pared del detector, uno de los productos (ya sea el protón o el tritón) puede ser capturado en la pared, mientras que el otro deposita su energía cinética en el gas de detención. La deposición de energía del tritón se puede observar a 191 keV y la del protón a 573 keV, manifestándose así el “efecto de pared”. El espectro de altura de pulso esperado para un tubo de tamaño típico se ilustra en la Figura 2, donde también se observa la estructura del escalón a la izquierda del pico y el ruido, que se debe principalmente a los electrones de baja energía que son producidos por los rayos gamma que se absorben en las paredes del detector [GFK08].

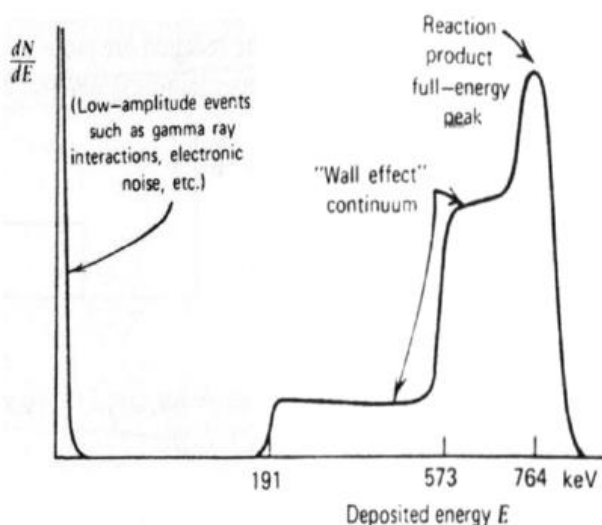


Figura 2 Espectro de altura de pulso esperado de un tubo de ^3He en el que el “efecto de pared” es significativo [GFK08]

2.4. Montaje experimental de la línea de producción de neutrones en el CNA

Durante la primera campaña de caracterización del haz de neutrones rápidos en el CNA, se realizó un montaje experimental para las medidas de producción consistente en: el haz de deuterones, el blanco de producción de neutrones, los monitores de neutrones y el sistema de adquisición digital de datos.

2.4.1. Configuración del acelerador

El acelerador se configuró con el haz de deuterio a una energía de 1010 keV y una corriente de unos 200 nA, que se midió con un integrador conectado al blanco de producción. Se almacenaron dos ficheros con información acerca de la corriente del haz asociada a cada segundo del día, que fue variando entorno a los 200 nA.

2.4.2. Blanco de producción de neutrones

Al final de la línea del haz se halla un tubo de vacío con una válvula que permite aislar la línea del haz de la parte del blanco de titanio deuterado. Este blanco de producción de neutrones se encuentra montado en un backing de aluminio de 3 mm de espesor y al final de un tubo que, por un lado, se conecta a la línea del haz y, por el otro, permite hacer vacío mediante una “tapa” de cobre de 500 μm de espesor. La Figura 3 muestra un esquema del final de la línea del haz, del blanco de producción de neutrones y una imagen que permite entender mejor el montaje del blanco.

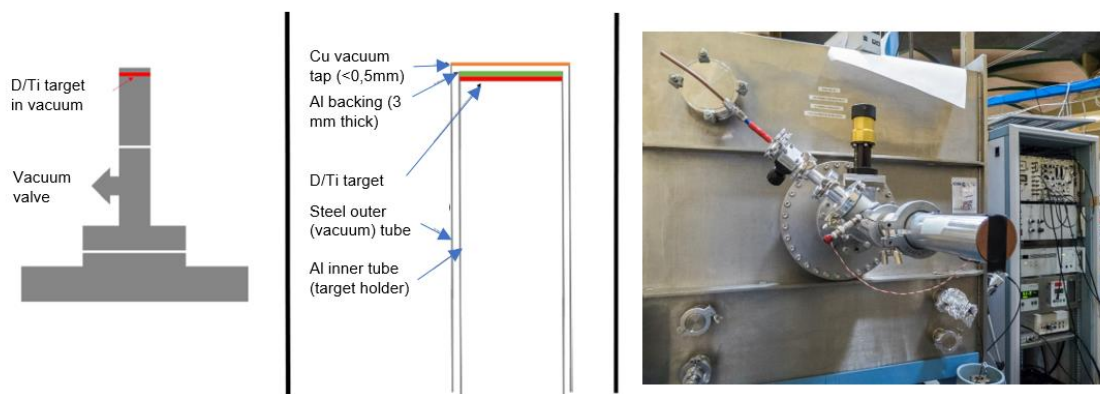


Figura 3. Final de la línea del haz y blanco de producción de neutrones.

La descripción de la configuración está disponible a partir de la documentación que se distribuyó previamente al experimento, el libro de registro que se realizó durante el mismo y las fotografías que se tomaron.

2.4.2.1. Características del blanco

La caracterización del blanco está disponible en la hoja de control proporcionada por el proveedor, cuya información queda resumida en la Tabla 1.

Características del blanco			Metales						Gas
			Aluminio		Titanio				Deuterio
Proveedor	Nº de serie	Tipo de blanco	Dimensión (mm)	Espesor (mm)	Dimensión (mm)	Superficie (cm ²)	Masa (ug/cm ²)	Masa (mg)	Ratio D/Ti
SODERN	CNA01	AITiD-31-Y	40 +/- 1	3 +/- 0,1	30	7,068	546	3,86	1,6

Tabla 1 Caracterización del blanco de titanio deuterado

2.5. Monitores de neutrones

Con tal de caracterizar el haz de neutrones producidos por la fuente de neutrones Hispalis, se disponía de dos detectores, el primero denominado Amon (Figura 4) y el segundo denominado Nmon (Figura 5), ambos desarrollados en el Laboratorio de Instrumentación Nuclear de la UPC.



Figura 4 Amon



Figura 5. Nmon

2.5.1. Descripción de los detectores

Las características del Amon y del Nmon quedan expuestas en la Tabla 2.

Nombre	Tubo (³ He)					Moderador (PE)		Blindaje		
	Modelo	HV	Presión	Diam.	Long.	Diám.	Largo	Material	Esp.	Long.
Amon	LND252251	1620 V	20 atm	2,54 cm	15 cm	10 cm	32 cm	Cadmio	1 mm	-
Nmon	LND252241	2190 V	20 atm	2,54 cm	34 cm	18,5 cm	44 cm	Silicona borada	5 mm	51 cm

Tabla 2. Descripción de los monitores

En ambos monitores se utiliza un moderador de polietileno de alta densidad para aumentar la eficiencia del detector a altas energías.

2.5.2. Configuración de los detectores

Para lograr una caracterización más efectiva del haz de neutrones rápidos, el Nmon se colocó fijo a 300 cm y $52,5^\circ$ del blanco, sirviendo así como mecanismo de normalización. Mientras que el Amon, empleado para lograr una caracterización angular y en función de la distancia, fue variando de posición. Éste último no solo se fue alejando del blanco (primero a 100 cm, luego a 150 cm, más adelante a 200 cm y finalmente a 125 cm), sino que también se cambió su posición angular (0° , 30° y 60°). En la Figura 6 queda representada la sala, mostrando la localización del blanco y de ambos monitores.

El blanco se situó a 160 cm de la pared lateral, 460 cm de la pared del fondo y 126 cm del suelo. Las paredes son de hormigón armado de aproximadamente 1 metro de espesor.

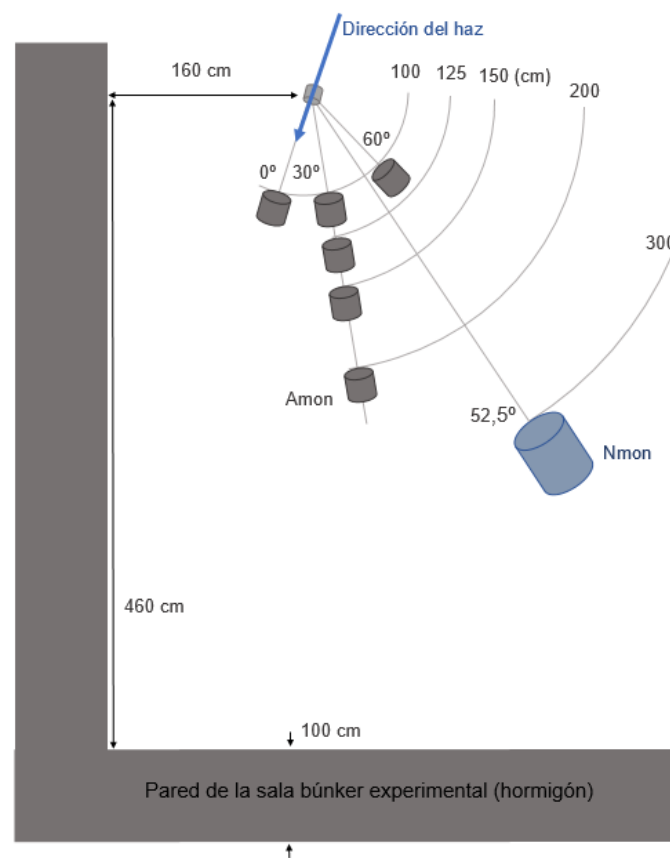


Figura 6. Esquema de la sala experimental con los detectores situados

2.5.3. Uso del cono de sombra

Para determinar de manera adecuada la tasa neta de neutrones rápidos que produce la fuente Hispalis en el Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla, es necesario descontar la tasa de conteo producida por neutrones dispersados por cuerpos que se encuentran en la cercanía de la fuente (scattering). Para ello, se utilizó el dispositivo de la Figura 7 para implementar la técnica del cono de sombra (shadow-cone), detalles se presentan en el Capítulo 3.

Se realizaron dos medidas de producción de neutrones para cada posición del Amon (distancia y ángulo), una con cono de sombra y la otra sin él. Se ha de mencionar que no se utilizó cono de sombra para las medidas del Nmon.

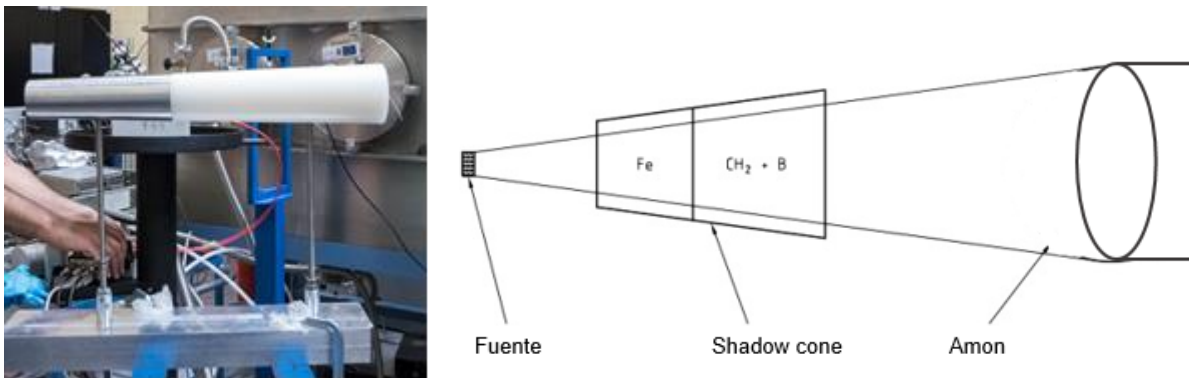


Figura 7. Cono de sombra

2.6. Sistema de adquisición de datos digital (DAQ)

Los sistemas digitales de adquisición de datos recogen datos análogos de sensores y los preprocesan y almacenan de manera digital para su posterior procesamiento y análisis.

La característica fundamental de la arquitectura de los sistemas de adquisición de datos es que cada grupo de sensores tiene tres procesos asociados: el proceso del sensor que interactúa con el sensor y convierte datos analógicos a valores digitales si es necesario, un proceso búfer y un procesamiento adicional [AGR09].

Debido a la gran cantidad de datos que se generan, el búfer selecciona unos datos que procesa y almacena listos para su posterior análisis (online) mientras que otros los almacena en el disco (offline) teniendo que realizar posteriormente el proceso adicional para poder analizarlos y estudiarlos. En la Figura 8 se muestra un esquema para entender

mejor el sistema de adquisición de datos explicado.

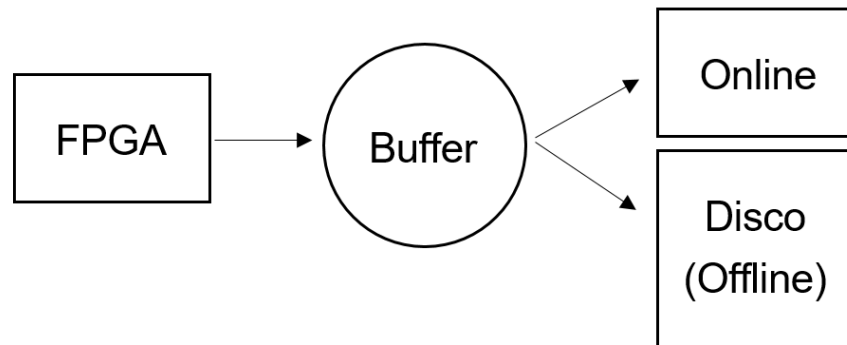


Figura 8. Esquema del sistema de adquisición de datos.

Una FPGA o matriz de puertas programables (del inglés Field Programmable Gate Array) es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada in situ mediante un lenguaje de descripción especial. En el caso que se ocupa, fue programado como un generador de patrón de pulso.

Para la campaña de medidas realizada se utilizó un sistema de adquisición digital de la UPC, desarrollado por el IFIC [IFIC10], que consta de: Digitalizador STRUCK SIS3316 (14bit, 16 CH, 250 MS/s por canal, triggerless), software de control GASIFIC70. El DAQ dispone de 3 canales, uno para el Amon, otro para el Nmon y el tercero para el pulsador, que es un generador de pulsos a una frecuencia de $100 \pm 0,5$ Hz, por esta razón, debería ser proporcional al tiempo de medición. El pulsador, adicionalmente, está replicado en el Amon y en el Nmon.

Cada vez que se producía una nueva medición de neutrones o una calibración, quedaba almacenado un archivo en el ordenador con todos los datos provenientes de los tres canales del DAQ. Para cada medición se almacenaron tanto los archivos contenidos en el online como los contenidos en el offline.

2.7. ROOT: Entorno de análisis de datos

Para el desarrollo de aplicaciones de análisis de datos a gran escala, el CERN desarrolló ROOT, un marco de programa escrito principalmente en C++ [ROOT11].

Así pues, durante la primera campaña de medición realizada en el CNA, los archivos se almacenaron en formato ROOT, para tener acceso de manera eficiente a los datos.

2.8. Tareas a realizar y organización del trabajo

En el presente trabajo se realizaron las siguientes tareas:

1. Estudio bibliográfico: Estudios sobre física nuclear, detectores de neutrones, mediciones de las tasas de conteo de neutrones, estadística de conteo y estimación de errores. Así como también entender todo lo relacionado con el experimento que se realizó del 4 al 7 de julio de 2016 en el CNA. Se realizó también un entrenamiento en ROOT. (Capítulo 2 y Capítulo 3).
2. Organización de los ficheros experimentales: Se organizaron la gran cantidad de documentos y datos almacenados sobre el experimento, para poder construir la base de datos a analizar. También, se crearon rutinas de automatización para el procesamiento y análisis de los datos. (Capítulo 4).
3. Estimaciones teóricas de producción de neutrones: Se obtuvieron después de calcular tanto la respuesta de los detectores (código LongCounter) como las tasas de producción en reacciones de fusión $D(d,n)^3\text{He}$ (NeuSDesc). (Capítulo 5).
4. Procesamiento y análisis de datos experimentales. Se obtuvieron las tasas de conteo netas en los detectores de neutrones. (Capítulo 6).
5. Comparación de las medidas de producción de neutrones con los modelos teóricos. (Capítulo 6).

Las mencionadas tareas quedan representadas en la Carta Gantt que se adjunta en el Capítulo 7, donde se muestra la planificación del presente proyecto.

3. Marco teórico para la medición de las tasas de conteo de neutrones

3.1. Medición experimental de las tasas de conteo

La magnitud de interés de este trabajo es la tasa de conteo.

$$M_T = M_{fuente} + M_{scat} + M_{back} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$M_T = M_{fuente} + M_{SC} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

M_T : Tasa de conteo total. Contiene la tasa de conteo debida a la fuente, la debida a la dispersión y la debida al fondo de radiación natural (background). (Ver Figura 9).

M_{fuente} o M_{neta} : Tasa de conteo de la fuente.

M_{scat} : Tasa de conteo debida a los efectos de dispersión. (Ver Figura 10).

M_{back} : Tasa de conteo debida a los efectos del fondo de radiación natural. (Ver Figura 11).

M_{sc} : Tasa de conteo usando un cono de sombra en la medida del A_{mon} . (Ver Figura 10).

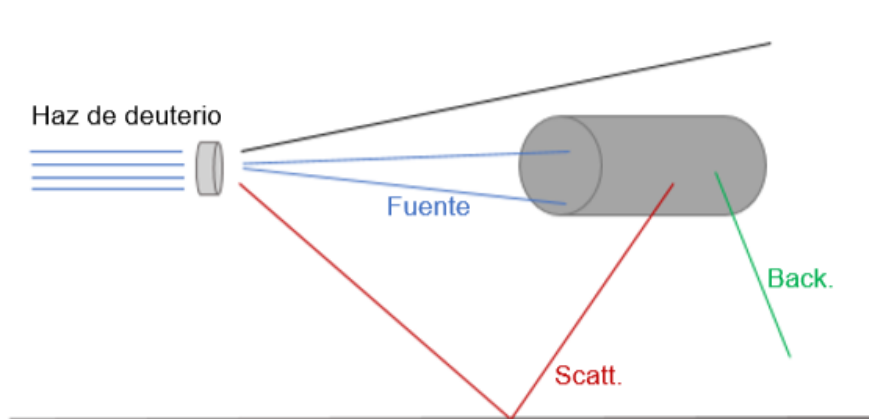


Figura 9. Conteo de neutrones sin cono de sombra. M_T .

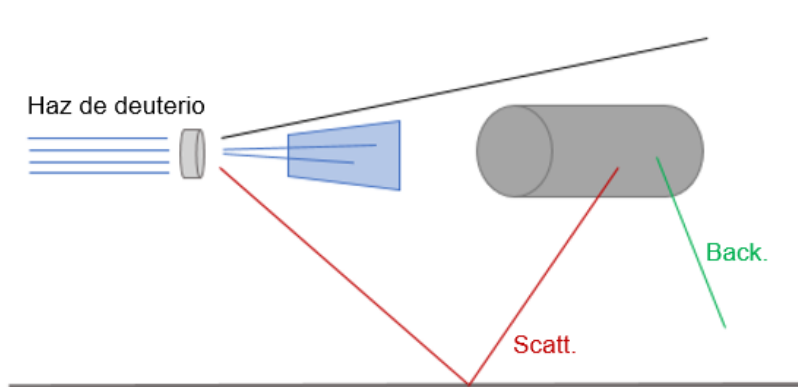


Figura 10. Conteo de neutrones con cono de sombra. Msc.

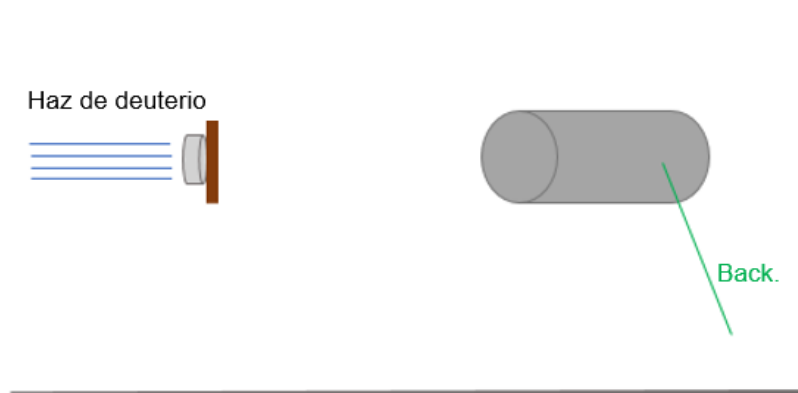


Figura 11. Conteo de neutrones con la línea del haz tapada. Mback.

Tal y como se observa en la Figura 9, los detectores detectan tanto las cuentas provenientes directamente de la fuente (en azul), como los neutrones que se producen por dispersión (en rojo), como los neutrones presentes en el fondo (en verde).

Así pues, por un lado, para poder descontar los efectos de la dispersión, se realizaron dos medidas con el Amon a la misma distancia y ángulo. Una medida se hizo con un cono de sombra colocado en el Amon y la otra sin éste. Este cono de sombra, como se observa en la Figura 10, no permite que los neutrones de la fuente lleguen al detector.

Por otro lado, también, se realizaron medidas de fondo tapando la salida del haz de neutrones y/o desconectándolo. Se realizó para poder caracterizar el fondo de neutrones a descontar de la tasa de conteo total.

3.2. ISO 8529-2. Reference neutron radiations

La teoría del análisis está basada en la ISO 8529-2 [ISO12] con algunas modificaciones. Cuando se usa el cono de sombra, se debería corregir la medida por el factor geométrico y el factor de atenuación al aire. Para el análisis experimental, no se tienen en cuenta correcciones por atenuación en el aire, ya que el efecto de estas correcciones no es significativo (menos del 1 %) respecto de las incertidumbres presentes en estas mediciones (ver Anexo 1). En cuanto al factor geométrico, a distancias largas no suele afectar. No obstante, éste último se tiene en cuenta en el análisis de las simulaciones, ya que está incluido dentro del código NeuSDesc (Ver Sección 5.2) y LongCounter (Ver Sección 5.1).

3.3. Análisis de datos

3.3.1. Nomenclatura

Tanto para el Amon como para el Nmon:

C_N: Cuentas en la ventana de espectro de neutrones (E: 160 – 860 keV). (Ver Figura 13).

C_P: Cuentas de reloj en el canal del detector. (Ver Figura 14).

P: Cuentas en el canal del pulsador, reloj.

3.3.2. Tiempo de conteo

El tiempo de conteo de cada medida corresponde a las cuentas de reloj de dicha medida entre la frecuencia del reloj.

$$\Delta t = \frac{C_P}{f_{reloj}} \quad (\text{Ec. 3})$$

3.3.3. Tasas de conteo

$$M = \frac{C_N}{\Delta t} = \frac{C_N}{C_P} \times f_{reloj} \quad (\text{M: MAmon, MNmon}) \quad (\text{Ec. 4})$$

- **Mediciones en el caso sin cono de sombra**

$$A_{mon}: M_{AmonT} = M_{Amonfuente} + M_{Amonscat} + M_{Amonback} \quad (Ec. 5)$$

$$N_{mon}: M_{NmonT} = M_{Nmonfuente} + M_{Nmonscat} + M_{Nmonback} \quad (Ec. 6)$$

- **Mediciones en el caso con cono de sombra**

$$A_{mon}: M_{AmonSC} = M_{Amonscat} + M_{Amonback} \quad (Ec. 7)$$

$$N_{mon}: M_{NmonT} \text{ (en el } N_{mon} \text{ no se utilizó cono de sombra durante las medidas).}$$

- **Mediciones de fondo**

$$A_{mon}: M_{Amonback}$$

$$N_{mon}: M_{Nmonback}$$

3.3.4. Fracción de conteo debida a la dispersión

La fracción de conteo debida a la dispersión en un detector se obtiene a partir de las ecuaciones Ec. 8, Ec. 9 y Ec. 10.

$$M_T - M_{SC} = M_{fuente} \quad (Ec. 8)$$

$$M_{fuente} = M_T \times (1 - \alpha_{Det}) \quad (Ec. 9)$$

$$\alpha_{Det} = \frac{M_{SC}}{M_T} \quad (Ec. 10)$$

3.3.5. Efectos de tiempo muerto

Entre dos eventos debe haber una cantidad mínima de tiempo que ha de separarlos para que ambos se graben como dos pulsos separados. Esta separación mínima de tiempo es la que recibe el nombre de “tiempo muerto” del sistema de conteo.

Dada una cierta tasa de conteo, se da alguna probabilidad de que un evento verdadero se pierda porque ocurre demasiado rápido después de un evento precedente. Estas pérdidas de tiempo muerto pueden volverse bastante severas cuando se encuentran altas tasas de conteo, y cualquier medición precisa de recuento realizada bajo estas condiciones debe

incluir algunas correcciones para estas pérdidas.

Para esta medición en particular, si la ratio entre las cuentas de neutrones del pulsador de cada monitor y del pulsador se aproxima a 1, los efectos de tiempo muerto son despreciables, esto es la Ec. 11.

$$Ratio_{tm} = \frac{C_P}{P} \quad (\text{Ec. 11})$$

3.4. Propagación de incertezas

La estimación de las incertezas en las tasas de conteo se obtiene desde la Ec. 12.

$$\Delta M = \frac{\Delta C_N}{C_P} = \frac{\sqrt{C_N}}{C_P} \quad (\text{M: } MA_{mont}, MA_{monSC}, MN_{mont}, MA_{monback}, MN_{monback})$$

(Ec. 12)

3.4.1. Normalizaciones

Para el análisis de datos se realizaron dos normalizaciones. En primer lugar, se normalizó la tasa de conteo del Amon a la tasa del Nmon. En segundo lugar, se normalizaron tanto las tasas del Amon como las del Nmon a la corriente del haz.

3.4.1.1. Nmon

$$\overline{MA_{mont, N}} = \frac{MA_{mont}}{MN_{mont}} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\overline{MA_{monSC, N}} = \frac{MA_{monSC}}{MN_{mont}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$\Delta \overline{MA_{mont, N}} = \frac{\Delta MA_{mont}^2}{MN_{mont}^2} + \left(\overline{MA_{mont, N}} \right)^2 \times \frac{(\Delta MN_{mont})^2}{MN_{mont}^2} \quad (\text{Ec. 15})$$

3.4.1.2. Corriente

$$\overline{M}_I = \frac{M}{I} \quad (M: MA_{mont}, MA_{mon_{sc}}, MN_{mont}) \quad (Ec. 16)$$

$$\Delta \overline{M}_I = \frac{\Delta M}{I} \quad (Ec. 17)$$

3.4.2. Incertezas debidas a las diferencias de tasas, para ambas normalizaciones

$$\overline{MA}_{mon_{fuente}} = \overline{MA}_{mon_T} - \overline{MA}_{mon_{sc}} = \overline{MA}_{mon_{neta}} \quad (Ec. 18)$$

$$\Delta \overline{MA}_{mon_{fuente}} = \sqrt{\left(\Delta \overline{MA}_{mon_T}\right)^2 + \left(\Delta \overline{MA}_{mon_{sc}}\right)^2} \quad (Ec. 19)$$

4. Organización de los ficheros experimentales y creación de la base de datos a analizar

Las mediciones empezaron el día 4 de julio de 2016, después de la puesta a punto del haz, y terminaron el 7 de julio del mismo año. A lo largo del experimento, se fueron anotando en dos cuadernos y en Excel (ver Anexo 2), la mayoría de los pasos que se iban realizando y a qué hora se hacían. Así pues, están dotados de información sobre los ajustes preliminares, calibraciones, energía del haz, corriente, uso del cono de sombra y configuración de los detectores en cada tanda de medición de neutrones. Por configuración de los detectores se entiende su posición (ángulo y distancia) al blanco. También, se disponía de los archivos en formato ROOT almacenados en el ordenador. Cada archivo era nombrado de tal manera que se supiese la hora de creación, el número de la medida (identificada como run), la localización del Amon y si a éste se le había colocado o no el cono de sombra.

Así pues, poniendo en común la información de los cuadernos, del documento Excel, del nombre de los archivos y de dos ficheros que se nos entregaron más adelante que contenían información acerca de la corriente del haz asociada a cada segundo del día, se realizó una tabla ordenada y organizada (ver Anexo 3) en la que cada fila corresponde a una nueva medición de conteo de neutrones o conteo de fondo de radiación (background) y las columnas proporcionan la siguiente información: fecha, hora de inicio, hora de fin, número de run, posición de cada detector, la aparición o no del cono de sombra, el nombre del archivo y observaciones e incidencias.

A continuación, se procedió a la simplificación de dicha tabla, pues solo eran de interés aquellos en los que tanto el Amon como el Nmon estaban conectados, resultando la Tabla 3.

Fecha	Hora Inicio	Hora fin	Run	Nmon	D (cm)	Ang (°)	Amon	D (cm)	Ang (°)	Cono	Archivo online	Archivo offline	Observaciones e incidencias
05/07/2016	?	19:39	i	Si	300	52.5	Si	100	0	sin	201607051939_bck.root	201607052030_bck_015.dlt	Medida de fondo, background
05/07/2016	20:30	9:30	ii	Si	300	52.5	Si	100	0	sin	201607052030_0930_bck_samples.root	201607052030_bck_samples_016.dlt	Medida de fondo, background
06/07/2016	12:50	12:58	4	Si	300	52.5	Si	100	0	sin	16071250_1300_AMon_0grados_1m_NoShCon.root	16071250_AMon_0grados_1m_NoShCon_004.dlt	
06/07/2016	13:37	13:46	5	Si	300	52.5	Si	100	0	con	16071337_1348_AMon_0grados_1m_ShCon_005.root	16071334_AMon_0grados_1m_ShCon_005.dlt	Shadow cone a 8 cm de la placa Cu
06/07/2016	14:06	14:17	6	Si	300	52.5	Si	100	30	sin	16071406_1416_AMon_330grados_1m_NoShCon.root	16071406_AMon_330grados_1m_NoShCon_006.dlt	Distancia detector- shadow cone de 42,5 cm
06/07/2016	14:44	14:52	7	Si	300	52.5	Si	100	30	con	16071443_1455_AMon_330grados_1m_ShCon.root	16071443_AMon_330grados_1m_ShCon_007.dlt	En el nombre pone 30° y en el logbook 60
06/07/2016	15:04	15:13	8	Si	300	52.5	Si	100	60	sin	16071504_1515_AMon_300grados_1m_NoShCon.root	16071504_AMon_300grados_1m_NoShCon_008.dlt	El cono tapa parte del haz que ve el Nmon
06/07/2016	15:26	15:30	9	Si	300	52.5	Si	100	60	con	16071526_1533_AMon_300grados_1m_ShCon.root	16071526_AMon_300grados_1m_ShCon_009.dlt	Distancia detector- shadow cone de 84 cm
06/07/2016	15:45	15:51	10	Si	300	52.5	Si	150	30	con	16071553_AMon_330grados_150cm_ShCon.root	16071545_AMon_330grados_150cm_ShCon_010.dlt	
06/07/2016	16:01	16:06	11	Si	300	52.5	Si	150	30	sin	16071608_AMon_330grados_150cm_NoShCon.root	16071600_AMon_330grados_150cm_NoShCon_011.dlt	
06/07/2016	?	18:26	iii	Si	300	52.5	Si	?	?	sin	160706D1rearBeamandNoBeam.root	160706D1rearBeamandNoBeam_012.dlt	Medida de fondo, background
06/07/2016	20:20	9:42	iv	Si	300	52.5	Si	?	?	sin	1607062020D1rear18x18Matrix_NoBeam.root	1607062020D1rear18x18Matrix_NoBeam_001.dlt	Medida de fondo, background
07/07/2016	11:55	12:01	42	Si	300	52.5	Si	200	30	con	1607071156_1206D1Pos212x12Matrix.root	1607071156D1Pos212x12Matrix_042.dlt	
07/07/2016	12:05	12:13	43	Si	300	52.5	Si	200	30	sin	1607071208_1217D1Pos27x7MatrixNoShadow.root	1607071208D1Pos27x7MatrixNoShadow_043.dlt	
07/07/2016	12:25	12:30	44	Si	300	52.5	Si	125	30	con	1607071227_1234D1Pos24x4MatrixShadow.root	1607071227D1Pos24x4MatrixShadow_044.dlt	Distancia D1 al cono 49 cm
07/07/2016	12:35	12:41	45	Si	300	52.5	Si	125	30	sin	16070712381243D1Pos20x0MatrixNoShadow.root	1607071238D1Pos20x0MatrixNoShadow_045.dlt	

Tabla 3 Organización de los archivos a analizar

En observaciones e incidencias se anotó que durante la medida número 9, el cono de sombra tapaba parte del haz que veía el Nmon. Debido a ello, más adelante se observó que la tasa de conteo no parecía tener sentido.

Como ya se ha comentado, para realizar la tabla, se obtuvo la información de diferentes fuentes. Así pues, para la estimación del intervalo de tiempo de cada run, se observó que las horas de inicio y fin que se anotaron no eran consistentes entre archivos, se daban unas desviaciones de 2 a 3 minutos. Por esta razón, resulta difícil estimar el rango horario exacto. Los rangos horarios presentados en la Tabla 3 son los que se han llegado a determinar después de la puesta en común de todos los ficheros y archivos. Así pues, se ha de mencionar que esta incertidumbre puede introducir ambigüedades en la estimación de la corriente de cada run.

4.1. Rutina de análisis. Tablas de datos online

Una vez localizados los doce archivos de interés para el análisis de la producción de neutrones y realizado el aprendizaje del sistema ROOT [ROOT11], se procedió a realizar los primeros análisis con los datos almacenados en el online.

Cada archivo contiene los histogramas asociados a los dos detectores y al pulsador (reloj). Así pues, seguidamente, con el objetivo de medir los eventos registrados de cada detector, las cuentas de reloj en el canal de cada detector, las cuentas de reloj en el canal del pulsador y la localización de los picos, se procedió a examinar los histogramas de cada archivo.

- angularMonitor_EFIR, Amon: contiene tanto las cuentas de neutrones del Amon, como las cuentas de pulsador del Amon, como las cuentas relacionadas con el ruido.

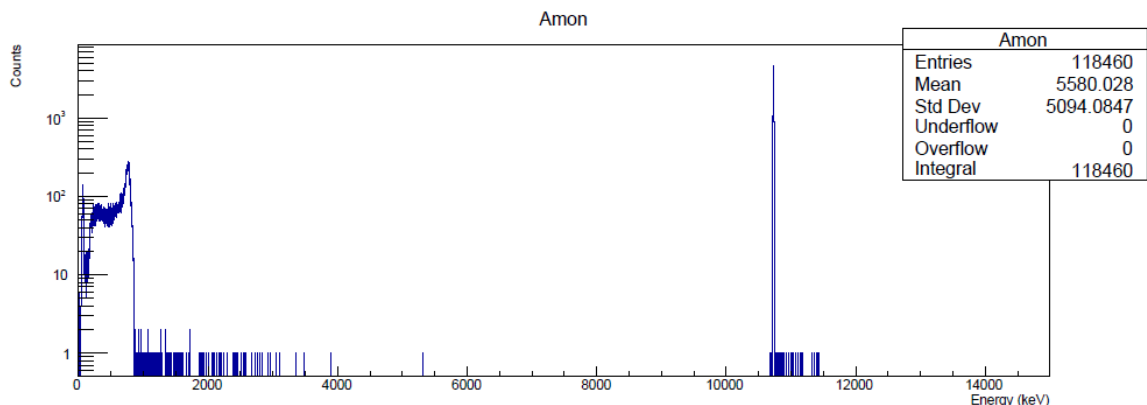


Figura 12. Histograma del Amon

En la zona de la izquierda, se observa tanto la zona de ruido eléctrico y rayos gamma como la zona de detección de neutrones (Ver Figura 13). En la zona de la derecha, se observa la zona de pulsador, es decir, la cantidad total de eventos que contó para esta parte de la señal (Ver Figura 14).

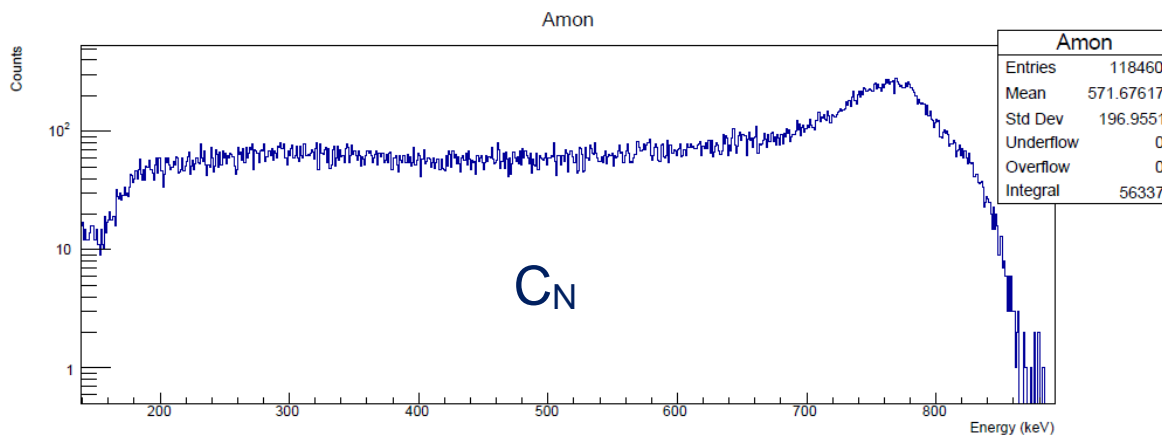


Figura 13. Zona de detección de neutrones. CN: cuentas de neutrones

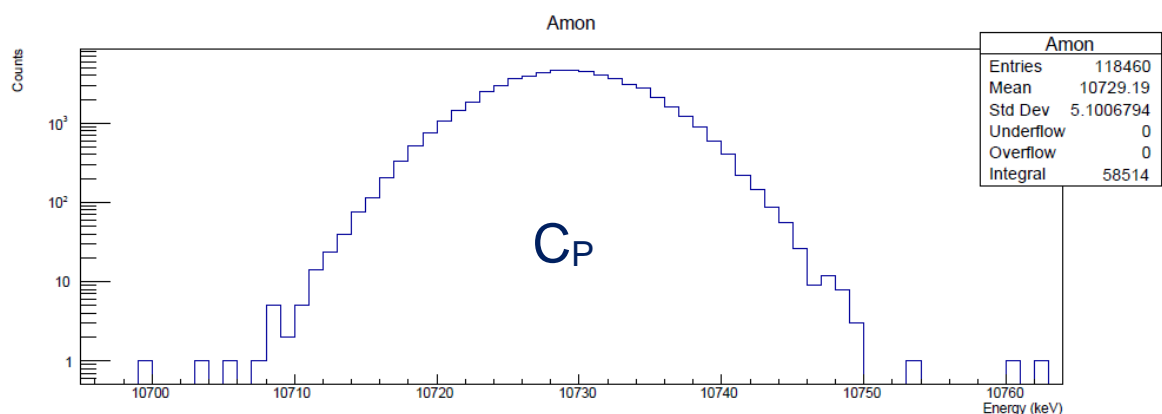


Figura 14. Zona de pulsador. CP: cuentas de pulsador

Para obtener las cuentas de reloj, se debe realizar la integral en el rango adecuado en la zona de pulsador.

Con tal de realizar un conteo apropiado de los neutrones detectados es necesario que la ventana del espectro de neutrones se defina de 160 a 860 keV, tal y como se muestra en la Figura 2. Para ello, se debió realizar una calibración del espectro de energía depositado en consola. El factor de calibración encontrado (ver Sección 4.2) se utilizó, posteriormente, para procesar de manera adecuada los datos del offline.

Para el cálculo del factor de calibración, se debe conocer la localización del pico presente en la detección de neutrones.

- neutronMonitor_EFIR, Nmon: contiene tanto las cuentas de neutrones del Nmon, como las cuentas de pulsador del Nmon, como las cuentas relacionadas con el ruido.

Tanto los histogramas como la rutina de análisis para el Nmon son equivalentes a las del Amon.

- Pulser_EFIR, Pulser: contiene la cantidad total de eventos que contó el pulsador.

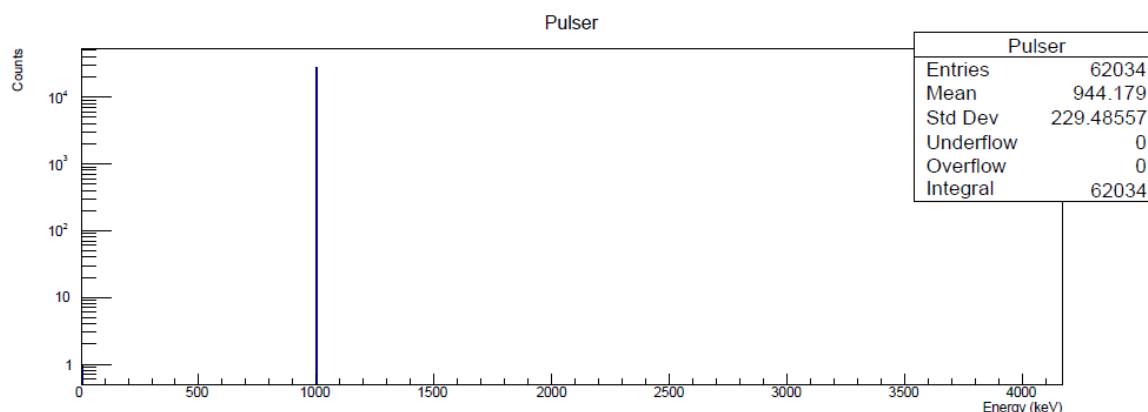


Figura 15. Pulser_EFIR

A fin de obtener todas las magnitudes de interés desde los archivos de datos, se creó un script en ROOT (ver Anexo 4), que permitió, además, sintetizar el análisis de los datos online. En el Anexo 5 se puede observar un ejemplo de los histogramas que devuelve el script desarrollado.

Después de procesar el script para cada archivo, el resumen de los conteos obtenidos para cada medida desde los archivos del online se presenta en la Tabla 4.

Run	Nmon	Amon	Dist. (cm)	Áng. (°)	Cono	Cuentas_Amon (cuentas)	Pulser_Amon (cuentas pulser)	Cuentas_Nmon (cuentas)	Pulser_Nmon (cuentas pulser)	Pulser (cuentas pulser)	Peak Amon (bin)	Peak Nmon (bin)
4	Sí	Sí	100	0	sin	56316	58526	30951	58544	58587	65140,6	203738
5	Sí	Sí	100	0	con	40151	64275	35217	64303	64340	64498,5	201562
6	Sí	Sí	100	30	sin	45951	57084	32771	57112	57144	65003,1	202462
7	Sí	Sí	100	30	con	31255	62532	31150	62555	62572	64456,4	203062
8	Sí	Sí	100	60	sin	30200	51124	27841	51138	51164	64865,6	202238
9	Sí	Sí	100	60	con	20514	40161	19291	40160	40181	64934,4	201412
10	Sí	Sí	150	30	con	22470	47758	26521	47755	47786	65278,1	200962
11	Sí	Sí	150	30	sin	24029	41030	23332	41039	41063	64796,9	203888
42	Sí	Sí	200	30	con	16476	64421	23199	64420	64445	64453,1	201904
43	Sí	Sí	200	30	sin	18738	41430	22427	41434	41455	64521,9	202612
44	Sí	Sí	125	30	con	15125	30132	16343	30117	30149	64659,4	203738
45	Sí	Sí	125	30	sin	22461	35912	19470	35916	35933	63971,9	204188

Tabla 4. Cuentas resultantes

4.2. Calibración de los detectores de neutrones

Los histogramas de conteo (EFIR) deben ser calibrados respecto de la energía depositada por la radiación detectada en el tubo. Esta calibración permite definir apropiadamente la ventana de identificación e integración de eventos neutrónicos.

Para calibrar los histogramas de conteo se utiliza una calibración lineal en energía tomando como referencia el pico de máxima deposición por captura de neutrones en ^3He . Este pico está localizado a 764 keV, tal y como se muestra en la Figura 2. Por tanto, se define el factor de calibración (Ec. 20) a partir de los datos del online (Tabla 4).

$$f_{cal} = \frac{764}{pico} \quad (\text{Ec. 20})$$

Siendo “pico” el punto de máxima deposición que se muestra en la Figura 16, cuyo valor se extrae desde los datos online utilizando la rutina de análisis del script desarrollado mencionado con anterioridad.

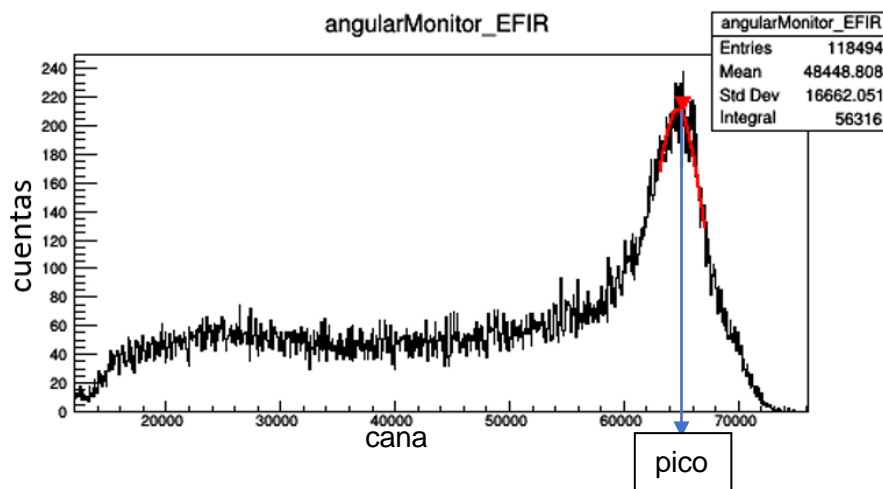


Figura 16. Localización pico neutrones

Como resultado se obtiene la Tabla 5. Los factores de calibración encontrados sirven para poder procesar el offline.

Run	Pico Amon (bin)	fcalAmon (keV/bin)	Pico Nmon (bin)	fcalNmon (keV/bin)
4	65140,6	0,0117	203738	0,0037
5	64498,5	0,0118	201562	0,0038
6	65003,1	0,0118	202462	0,0038
7	64456,4	0,0119	203062	0,0038
8	64865,6	0,0118	202238	0,0038
9	64934,4	0,0118	201412	0,0038
10	65278,1	0,0117	200962	0,0038
11	64796,9	0,0118	203888	0,0037
42	64453,1	0,0119	201904	0,0038
43	64521,9	0,0118	202612	0,0038
44	64659,4	0,0118	203738	0,0037
45	63971,9	0,0119	204188	0,0037

Tabla 5. Factores de calibración para cada run

4.3. Evaluación de los efectos de tiempo muerto

A partir de la Ec. 11, se calculan las ratios de tiempo muerto tanto para el Amon como para el Nmon (Tabla 6) con el fin de observar los efectos de dicho tiempo muerto. Debido a que las ratios son siempre muy cercanas a 1, se desprecian los efectos de tiempo muerto. Esto es porque las cuentas de pulsador son semejantes a las del pulsador en el canal del detector, así pues, ninguno de los dos detectores presenta pérdidas significativas de conteo.

Se graficaron las ratios de tiempo muerto en el Amon para dar constancia de la cercanía a la unidad (Figura 17). La gráfica para el Nmon es semejante.

Run	C _p Amon (cuentas pulser)	C _p Nmon (cuentas pulser)	P (cuentas pulser)	Ratio _{tm} Amon	Ratio _{tm} Nmon
4	58526	58544	58587	0,9990	0,9993
5	64275	64303	64340	0,9990	0,9994
6	57084	57112	57144	0,9990	0,9994
7	62532	62555	62572	0,9994	0,9997
8	51124	51138	51164	0,9992	0,9995
9	40161	40160	40181	0,9995	0,9995
10	47758	47755	47786	0,9994	0,9994
11	41030	41039	41063	0,9992	0,9994
42	64421	64420	64445	0,9996	0,9996
43	41430	41434	41455	0,9994	0,9995
44	30132	30117	30149	0,9994	0,9989
45	35912	35916	35933	0,9994	0,9995

Tabla 6. Ratios de tiempo muerto en Amon y Nmon

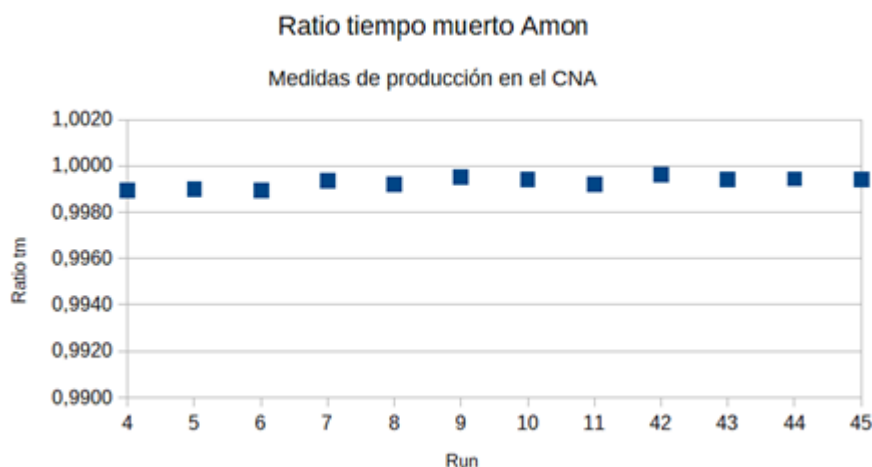


Figura 17. Gráfica tendencia ratios de tiempo muerto

4.4. Corriente del haz

A continuación, se procedió a encontrar la corriente del haz asociada a cada medida. Debido a que no se fueron guardando los ficheros de corriente cada vez que se salvaba un run, se disponía de dos ficheros, uno del día 6 de julio y el otro del día 7. Ambos ficheros están dotados de información acerca de la corriente del haz asociada a cada segundo del día. Así pues, se procedió a la realización de un nuevo script (ver Anexo 6), para la obtención de la corriente asociada a cada run, a partir de las horas de inicio y de fin de medida de la Tabla 3, resultando los valores de la Tabla 7.

Run	Corriente (uA)			
	Valor	DesvEst	NºEventos	Error
4	0,2000	0,0093	515	0,0004
5	0,2093	0,0165	548	0,0007
6	0,2054	0,0201	661	0,0008
7	0,1974	0,0086	519	0,0004
8	0,2067	0,0076	561	0,0003
9	0,2154	0,0056	254	0,0004
10	0,2142	0,0058	379	0,0003
11	0,2140	0,0066	334	0,0004
42	0,2023	0,0030	361	0,0002
43	0,2022	0,0032	458	0,0002
44	0,2028	0,0029	334	0,0002
45	0,2046	0,0029	363	0,0002

Tabla 7. Medidas de corriente del haz asociadas a cada run

4.5. Tablas de datos offline

Una vez procesados los archivos del offline, se procedió a realizar el mismo análisis que el realizado para el online.

Debido a que se pueden despreciar los efectos de tiempo muerto (Sección 4.3), y siendo razonable el encontrar unas tasas de conteo consistentes entre el online y el offline, se procede a hacer el resto del análisis a partir de las tasas obtenidas en el offline.

Se organizaron los datos en dos tablas distintas, una con los runs necesarios para el estudio de la tasa de conteo en función de la distancia (Tabla 8) y la otra para su caracterización en función de la posición angular (Tabla 9).

Run	Dist. (cm)	Ángulo (°)	Cuentas_Nmon (cuentas)	Pulser_Nmon (cuentas pulser)	Cono	Cuentas_Amon (cuentas)	Pulser_Amon (cuentas pulser)
6	100	30	sin	32752	57244	45787	57235
7	100	30	con	31109	62656	31159	62648
44	125	30	con	16299	30116	15047	30131
45	125	30	sin	19424	35908	22327	35902
10	150	30	con	26447	47762	22374	47766
11	150	30	sin	23258	41015	23882	41015
42	200	30	con	22625	63491	16384	63499
43	200	30	sin	22369	41421	18659	41420

Tabla 8. Cuentas resultantes offline, caracterización en función de la distancia

Run	Dist. (cm)	Ángulo (°)	Cuentas_Nmon (cuentas)	Pulser_Nmon (cuentas pulser)	Cono	Cuentas_Amon (cuentas)	Pulser_Amon (cuentas pulser)
4	100	0	30875	58529	sin	56044	58530
5	100	0	35145	64372	con	40007	64366
6	100	30	32752	57244	sin	45787	57235
7	100	30	31109	62656	con	31159	62648
8	100	60	27862	51333	sin	30170	51336
9	100	60	19246	40150	con	20400	40157

Tabla 9. Cuentas resultantes offline, caracterización angular

Para la medida número 9, como ya se ha comentado con anterioridad, el cono de sombra tapaba parte del haz que veía el Nmon y, debido a ello, más adelante, se observó que la tasa de conteo presentaba inconsistencias.

En el run 42 también se aprecia una incidencia, pues el valor de las cuentas de neutrones detectados es muy bajo en relación a las cuentas de pulsador, hecho que lleva a encontrar unas tasas de conteo que tampoco parecen tener sentido.

5. Estimaciones teóricas de producción de neutrones

5.1. Respuesta de los detectores de neutrones

Con el objetivo de determinar las componentes directas (fuente) de neutrones que llegan a los detectores en diferentes posiciones, así como la correspondiente respuesta del detector, se realizaron un conjunto de simulaciones Monte Carlo usando Geant4 [GE413].

Geant4 es un código que consiste en un paquete de librerías C++ en el que se pueden construir códigos de simulación específicos. El Laboratorio de Instrumentación Nuclear de la UPC ha desarrollado un código llamado LongCounter [ATP14] [ATJ15] (Anexo 7) que funciona en Geant4 y que permite realizar simulaciones de contadores proporcionales moderados. Es decir, se hicieron simulaciones de mediciones específicas para determinar la respuesta o eficiencia del detector.

En primer lugar, se investigó cómo era el espectro de energía esperado de la reacción usando NeuSDesc, hecho que permitió establecer un rango de energía de 3 MeV a 5 MeV. Así, el código LongCounter realiza un barrido de energía en dicho rango y calcula el número de eventos detectados.

En segundo lugar, se debe configurar la medición deseada. Es decir, localizar el detector a la distancia y ángulos de interés y realizar una serie de cálculos para que la simulación sea exitosa, tales como el área del detector irradiada, el ángulo sólido del detector y el ángulo sólido de la fuente, necesarios para determinar el número de eventos detectados en el área irradiada del detector y la respuesta de éste. Se toma como ejemplo la simulación con el Amon a 100 cm de distancia de la fuente puntual para explicar con detenimiento en qué consiste este segundo paso (Ver Tabla 10).

5.1.1. Caracterización de la simulación

5.1.1.1. Nomenclatura

Alrr: Área irradiada del detector (cm^2).

AngSD: Ángulo sólido del detector (sr).

AngSF: Ángulo sólido de la fuente (sr). El ángulo sólido de la fuente debe ser mayor al del detector, para garantizar que llegan eventos a toda el área irradiada del detector.

D: Distancia del detector a la fuente (cm).

NEv: Número de eventos simulados.

NEvIrr: Número de eventos en el área irradiada del detector.

R: Radio (cm).

Resp: Respuesta (cm²).

Theta: Ángulo theta (rad).

5.1.1.2. Ecuaciones

$$AIrr = \pi \times R^2$$

(Ec. 21)

$$NEvIrr = NEv \times \frac{AngSD}{AngSF}$$

(Ec. 22)

$$AngSD = 2 \times \pi \times \left(1 - \frac{D}{\sqrt{R^2 + D^2}} \right)$$

(Ec. 23)

$$AngSF = 2 \times \pi \times (1 - \cos(Theta))$$

(Ec. 24)

$$Resp = \frac{NEv}{NEvIrr} \times AIrr$$

(Ec. 25)

$$Error Resp = \frac{\sqrt{NEv}}{NEvIrr} \times AIrr$$

(Ec. 26)

Así, como ejemplo, la Tabla 10 muestra los resultados correspondientes al Amon a 100 cm de distancia de la fuente. En este caso se realizó una simulación de 2 millones de eventos.

	Nomenclatura	Unidades	Valor
Distancia fuente-detector	D	cm	100
Radio	R	cm	5,015
Área irradiada del detector	AIrr	cm ²	79,012
Ángulo sólido del detector	AngSD	sr	0,0079
Theta	Theta	grados	3
Ángulo sólido de la fuente	AngSF	sr	0,0086
Eventos totales	NEv	#	2000000
Eventos en el área irradiada	NEvIrr	#	1831705,3

Tabla 10. Características Amon a 100 cm de la fuente

Se realizaron simulaciones para el Amon a 100 cm, 125 cm, 150 cm, 200 cm, 250 cm y 350 cm. Para el Nmon se realizaron simulaciones a 100 cm, 150 cm, 225 cm, 300 cm y 350 cm. Los valores de la respuesta resultantes se muestran en las tablas presentes en el Anexo 8. Para el Amon, por ejemplo, la tendencia de la respuesta es la mostrada en el gráfico de la Figura 18.

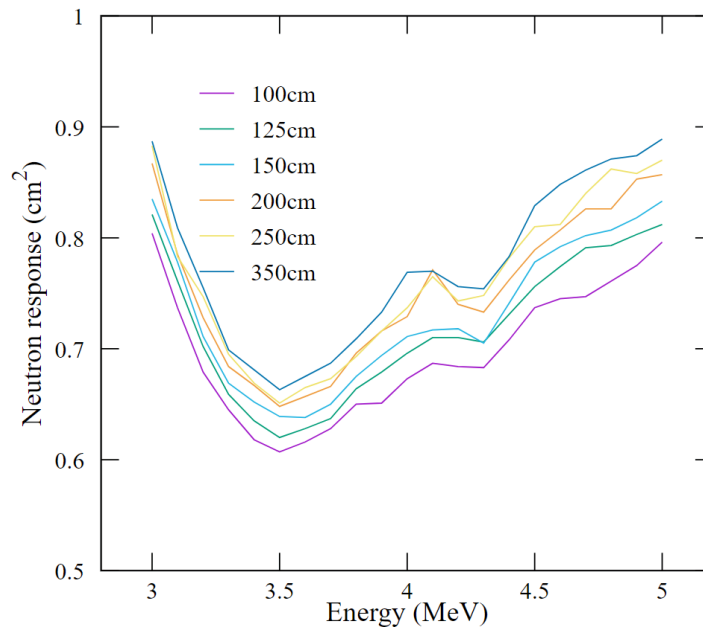


Figura 18. Tendencia de la respuesta en el Amon para un rango de energías de 3 a 5 MeV

A partir de las tablas mostradas en el ya mencionado Anexo 8, se prepararon los archivos para la función de respuesta (punto por punto) a una distancia determinada, tanto para el Amon como para el Nmon. En estos archivos se observan tres columnas: en la primera, se encuentra la energía de los neutrones (en MeV), en la segunda, la respuesta (en cm²) y en la tercera, el error que aparece en el cálculo de las respuestas.

Todos los archivos obtenidos se usan para, junto con el cálculo de la fluencia obtenida en NeuSDesc (Sección 5.2), calcular la tasa teórica (Sección 5.3).

5.2. NeuSDesc

El objetivo principal de NeuSDesc es, con el conocimiento de la configuración experimental, calcular la producción de neutrones en función de la energía en una instalación.

En NeuSDesc se presentan la fluencia y el espectro de neutrones y también se muestran los efectos de la amplificación de los picos, tales como el desorden angular y energético de

los iones en el haz y la dispersión de energía del haz de iones incidente.

En el presente trabajo, NeuSDesc se utiliza para tener un cálculo teórico de la producción de neutrones en los experimentos realizados en el CNA.

En la ventana del programa, apreciable en la Figura 19, se puede observar que los datos de entrada se ingresan en cuadros de entrada blancos mientras que los datos calculados se presentan en cuadros en gris, pudiéndose crear también archivos.

Las entradas para las simulaciones realizadas en NeuSDesc quedan descritas en la Tabla 11.

NeuSDesc ver. 1.0, EC-JRC-IRMM, Aug-2008

Ions and neutrons

Reaction: Competing reactions: ☐ Ion energy is below threshold ☐ Ion energy in double valued region ☐ Not in mono-energetic region

Ion energy (keV): Neutron emission angle: Current (μA): Distance (mm):

Ti, Li or LiF thicken. (μg/cm²): T, D/Ti ratio:

Gas pressure (kPa): Gas cell length (mm): Entrance foil material: Entrance foil thickness: μg/cm²

Neutron energies (MeV): Max: Average: Min: % width:

Neutron yield data: Mean fluence rate (n/cm² s): Mean yield (n/(sr s)): Dose rate (mSv/hour):

Ion E-loss in target (keV): Ion E-loss in target (%): E-loss in foil (keV):

TOF (ns) neutron / gamma: / delta-TOF (ns) neutron:

Cross-section at incident ion energy: Total (mb): Differential (mb/sr):

General SRIM settings

☒ SRIM2008 not properly installed: ☐ Include angular straggling for all SRIM based energy loss calculations

Simulated ions in SRIM:

Programme opened: 2018/01/12 18:50:43

Spectrum

List for angles List for energies Calculate spectrum

Calculate spectrum, including energy straggling (starts SRIM)

Full angle spectrum

Detector radius (mm): # Points used to determine average fluence:

Calculate spectrum, full angle

Calculate spectrum, full angle including energy straggling (starts SRIM)

Source description for MCNP

Settings: Customize sdf card settings # Directions: # Point sources:

Calculate MCNP sdf card

Calculate MCNP sdf card including energy straggling (starts SRIM)

Figura 19. Ventana NeuSDesc

Reaction	D(d,n) ³ He, D/Ti target		Entrance foil		Neutron emission angle		Current	Distance	
Energy	Thickness	T,D/Ti ratio	Material	Thickness	Amon	Nmon	*for normalisation	Amon	Nmon
(keV)	(μg/cm ²)	-	-	(μg/cm ²)	(grados)	(grados)	(μA)	(cm)	(cm)
1010	546	1,6	N/A	0	0/30/60	52,5	1	100/125/150/200	300

Tabla 11. Inputs para las simulaciones NeuSDesc

La opción "Full angle spectrum" ("Espectro de ángulo completo"), se utiliza para el cálculo de la fluencia de neutrones promediada en función de la energía en la posición del detector de neutrones (Amon o Nmon). De acuerdo con el manual de software [NEU05], esta función calcula un espectro de neutrones integrado en una superficie de disco circular. La integración se puede realizar con o sin energía y desorden angular (utilizando SRIM-2008

[JFZ16]). En cualquier caso, la opción ejecuta una integración de Monte Carlo realizada aleatorizando un número de puntos sobre la superficie y seguido del cálculo del espectro de neutrones promedio de estos puntos. Para el cálculo, se debe ingresar el radio del disco circular y la cantidad de puntos utilizados para estimar el promedio. En el presente trabajo, el radio del Amon es de 50,15 mm, el del Nmon de 91,5 mm y se utilizaron 99999 puntos para estimar el promedio (el máximo permitido).

Esta opción produce un archivo de salida donde se encuentra anotada la fluencia resultante punto a punto, un ejemplo de archivo obtenido se encuentra en la Figura 20.

```
...
...
=====
The sum of the spectra from the reaction(s):
D(d,n)3He, D/Ti target

Total summed fluence (n/cm2 s): 0.6798E+02

----- Neutron spectrum -----
Neutron energy   Fluence
(MeV)   (n/(cm2 MeV s))
3.7485 0.14074E+01
3.7506 0.75310E+01
3.7527 0.16461E+02
3.7548 0.27053E+02
...
...
```

Figura 20. Archivo NeuSDesc fluencia punto a punto

Estos cálculos se usaron para generar archivos de datos para la relación D-Ti dada, en función de si correspondía al Amon o al Nmon y según el ángulo y distancia simulada. En estos archivos, el rango de energía se definió de 0 a 10 MeV y la fluencia se normalizó a la corriente del haz. Así pues, en ellos, encontramos dos columnas, una que indica la energía de los neutrones y otra que muestra la fluencia en unidades de (neutrones/(cm² MeV μA)).

Todos los archivos obtenidos se usan para, junto con el cálculo de la respuesta, calcular la tasa teórica de conteo (Ver Sección 5.3).

5.3. Tasas de conteo teóricas

Dada la fluencia promediada en el detector en función de la energía, $F(E)$, obtenida con NeuSDesc, y la respuesta del detector en función de la energía, $r(E)$, obtenida con el código LongCounter, la tasa de conteo esperada, $M_{S_{det}}$, viene dada por la ecuación Ec. 27.

$$M_{S_{det}} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} F(E) \times r(E) \times dE \quad (\text{Ec. 27})$$

Para el cálculo de la anterior integral (Ec. 27), se me facilitó una rutina en ROOT en la que, mediante métodos de interpolación, se realiza dicha integral en las funciones de aproximación $F(E)$ y $r(E)$ para obtener el cálculo numérico final, la tasa de conteo esperada $M_{S_{det}}$.

A modo de ejemplo, para el cálculo de la tasa teórica en el Amon a 100 cm y 30°, la ejecución de la rutina se realizó tal y como muestra la Figura 21.

Una vez obtenidos todos los resultados, estos se resumieron en la Tabla 12, para el Amon a una distancia de 100 cm para ángulos de 0 °, 30 ° y 60 °, en la Tabla 13, para el Amon a un ángulo de 30° para distancias de 100 cm, 125 cm, 150 cm y 200 cm y en la Tabla 14, para el Nmon a una distancia de 30 cm y un ángulo de 52,5 °.

```
$ root -l
root [0] .L calcRateFromDatafiles.C
root [1] calcRateFromDatafiles("./Spect_ratioDTi_1.6/Spect-
Full_Amon_30deg_1000mm.txt",2,false,"Resp_Amon_100cm",2,true)
*****
*           Calculation of counting rates           *
*****

*** Fluence spectrum: F(E)
    File loaded: ./Spect_ratioDTi_1.6/Spect-Full_Amon_30deg_1000mm.txt

*** Neutron response: R(E)
    File loaded: Resp_Amon_100cm

*** Energy range for integral (MeV):
    Emin=3 ; Emax=5

*** Counting rate:
    \int_{Emin}^{Emax} F(E)*R(E)*dE = 69.08658881      (Check normalization units!)
```

Figura 21. Ejecución de la rutina para la obtención de las tasas de conteo teóricas

Amon			
Distancia	Ángulo	MSAmon	MSAmon/MSNmon
(cm)	(grados)	(cuentas/(s μ A))	(Un. Arb.)
100	0	123,7750292	3,25706072
100	30	69,08658881	1,817969393
100	60	27,29297669	0,718197223

Tabla 12. Tasas de conteo teóricas del Amon, caracterización angular

Amon			
Distancia	Ángulo	MSAmon	MSAmon/MSNmon
(cm)	(grados)	(cuentas/(s μ A))	(Un. Arb.)
100	30	69,08658881	1,817969393
125	30	45,64872769	1,20121707
150	30	32,33936142	0,85098961
200	30	18,76402138	0,49376322

Tabla 13. Tasas de conteo teóricas del Amon, caracterización en función de la distancia

Nmon		
Distancia	Ángulo	MSNmon
(cm)	(grados)	(cuentas/(s μ A))
300	52,5	38,00206378

Tabla 14. Tasa de conteo teórica del Nmon

Las tasas de conteo teóricas encontradas están normalizadas a la corriente y, para el Amon, se ha añadido una cuarta columna en la que se normaliza la tasa de conteo del Amon a la del Nmon, para poder comparar los valores encontrados con la misma normalización realizada con los datos experimentales en el Capítulo 6, Sección 6. Así pues, estos resultados teóricos se comparan más adelante con las tasas de conteo experimentales (Capítulo 6), para observar si son consistentes.

6. Resultados del análisis

6.1. Caracterización del fondo de neutrones

A lo largo del experimento se hicieron dos tipos de medidas de fondo.

1. Adquisición entre medidas (BeamOff). Estas medidas de fondo se hicieron con la salida principal del haz bloqueada. Así, en teoría, no hay deuterones que lleguen al blanco.
2. Adquisición durante la noche, período en el cual se apaga la fuente de iones.

En un primer lugar, se encontraron los archivos tanto del online como del offline que correspondían con estas medidas de fondo y se analizaron tal y como se hizo con los archivos para la medición de la producción.

Los resultados obtenidos para las medidas de fondo registradas por los detectores Amon y Nmon vienen resumidos en la Tabla 15 y en la Tabla 16.

Amon			Online		Offline	
			MAmonback		MAmonback	
Medidas background			(cuentas/s)		(cuentas/s)	
Fecha fin	Time	Type	Valor	Error	Valor	Error
05/07/2016	19:39	BeamOff	0,024	0,003	--	--
06/07/2016	9:30	Noche	0,0241	0,0007	0,0244	0,0007

Tabla 15. Medidas de fondo en el Amon

Nmon			Online		Offline	
			MNmonback		MNmonback	
Medidas background			(cuentas/s)		(cuentas/s)	
Fecha fin	Time	Type	Valor	Error	Valor	Error
05/07/2016	19:39	BeamOff	0,037	0,004	--	--
06/07/2016	9:30	Noche	0,0373	0,0009	0,0369	0,0009
06/07/2016	18:26	BeamOff	17,88	0,08	17,86	0,08
07/07/2016	9:42	Noche	0,074	0,001	0,074	0,001

Tabla 16. Medidas de fondo en el Nmon

De las tablas se concluye que los resultados del online y del offline son equivalentes, tal y

como era de esperar. También, se concluye que las medidas de noche y BeamOff del día 5 de julio y de la noche del 5 al 6 son equivalentes en ambos detectores. No obstante, la medida BeamOff del día 6 por la tarde es de tres órdenes de magnitud mayor. Después de hablar con los responsables del CNA, se constató que esto podía ser debido a que cuando se para el haz un período corto de tiempo, los operarios colocan diferentes “Faraday Cup”, que son dispositivos de metal diseñados para atrapar partículas cargadas en vacío, en distintos puntos de la línea, lo que significa que es posible que estén produciendo neutrones secundarios.

El conteo de fondo detectado por los detectores Amon y Nmon es, en general, menor que las fluctuaciones de las tasas de conteo registradas cuando existe producción de neutrones en el blanco (ver secciones 6.2 y 6.3). Por esta razón, en lo que sigue del análisis, se desprecian las correcciones por conteo de fondo en los cálculos de las tasas netas y de la fracción de conteo por dispersión.

6.2. Medidas de producción en función de la distancia al blanco

En un primer lugar, con la Ec. 4, se calculan las tasas de conteo del Amon y del Nmon, en cuentas de neutrones por segundo. También, con la Ec. 5, la Ec. 7 y la Ec. 19 se calculan las tasas de conteo netas del Amon.

Configuración Amon		Amon sin SC						Amon con SC						MAmon _{Neta}	
Dist. (cm)	Áng. (°)	Run	MAmonT		MNmonT		Run	MAmonSC		MNmonT		Valor (cuentas/s)	Error	Valor (cuentas/s)	Error
			Valor	Error	Valor	Error		Valor	Error	Valor	Error				
			(cuentas/s)		(cuentas/s)			(cuentas/s)		(cuentas/s)				(cuentas/s)	
100	30	6	80	0,57	57,2	0,41	7	49,7	0,39	49,7	0,39	30,3	0,69		
125	30	45	62,2	0,51	54,1	0,48	44	49,9	0,47	54,1	0,48	12,3	0,69		
150	30	11	58,2	0,49	56,7	0,49	10	46,8	0,38	55,4	0,41	11,4	0,62		
200	30	43	45	0,38	54	0,48	42	25,8	0,24	35,6	0,27	19,2	0,45		

Tabla 17. Medidas de producción en función de la distancia al blanco

Tal y como se ha comentado con anterioridad, en el run 42, que corresponde a la medida a 200 cm con cono de sombra, se anotó una incidencia. De esta manera, para esta medida, se observa una tasa de conteo del Amon de 25,8 cuentas de neutrones por segundo y del Nmon de 35,6 cuentas de neutrones por segundo, valores inferiores a las demás tasas obtenidas.

6.3. Medidas de producción angular

Del mismo modo que lo realizado en la sección anterior, en un primer lugar, con la Ec. 4, damos con las tasas de conteo del Amon y del Nmon, en cuentas de neutrones por segundo. También, con la Ec. 5, la Ec. 7 y la Ec. 19 se calculan las tasas de conteo netas del Amon.

Configuración Amon		Amon sin SC					Amon con SC					MAmon _{Neta}	
		Run	MAmonT		MNmonT		Run	MAmonSC		MNmonT			
Dist.	Áng.		Valor	Error	Valor	Error		Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error
(cm)	(°)		(cuentas/s)		(cuentas/s)			(cuentas/s)		(cuentas/s)		(cuentas/s)	
100	0	4	95,8	0,62	52,8	0,4	5	62,2	0,43	54,6	0,41	33,6	0,75
100	30	6	80	0,57	57,2	0,41	7	49,7	0,39	49,7	0,39	30,3	0,69
100	60	8	58,8	0,42	54,3	0,4	9	50,8	0,47	47,9	0,38	8	0,63

Tabla 18. Medidas de producción angular

En esta tabla se ha de destacar que, como ya se ha comentado, en la medida 9 el cono de sombra tapaba parte del haz irradiado al Nmon. Debido a ello, la tasa del Nmon correspondiente a esta medida es inferior a las demás.

6.4. Efectos de dispersión en la medida del Amon

A continuación, se reportan valores medidos de la fracción de conteo (Ec. 10) debida a la dispersión en la medida del Amon. Su valor se puede encontrar gracias al uso del cono de sombra.

Amon			
Distancia (cm)	Ángulo (grados)	α_{Amon}	
		Valor	Error
100	0	64,93 %	0,61 %
100	30	62,13 %	0,66 %
100	60	86,39 %	1,01 %

Tabla 19. Efectos de dispersión caracterización angular

Amon			
Distancia (cm)	Ángulo (grados)	α_{Amon}	
		Valor	Error
100	30	62,13 %	0,66 %
125	30	80,23 %	1,00 %
150	30	80,41 %	0,94 %
200	30	57,33 %	0,72 %

Tabla 20. Efectos de dispersión caracterización en función de la distancia

Tal y como se observa en la Tabla 19 y en la Tabla 20, la tasa de conteo experimental está dominada por los efectos de dispersión. En efecto, para el ángulo de 30° la fracción de conteo por dispersión tiene una tendencia creciente en la medida que el detector se aleja

del blanco y se acerca a la pared. Para la medida de 200 cm da un valor diferente y menor debido a que corresponde a la medida del run 42, donde ya se ha comentado anteriormente que se han observado incidencias. En cuanto al ángulo, a 0° la fracción de conteo por dispersión es mayor, pues se encuentra más cerca de la pared lateral que a 30° , y a 60° vuelve a ser mucho mayor por su cercanía a la pared y a obstáculos en la sala. Es decir, la tendencia analizada de la componente de dispersión tiene sentido analizando la situación de los detectores en la sala, ya que se observa mucho material alrededor de los detectores y también es de importancia el hecho de que la fuente se encuentre a 1,6 m de la pared lateral, a 4,6 m de la pared del fondo y a 1,26 m del suelo.

Se ha de volver a mencionar también que durante la ejecución experimental no se realizó ninguna medición para determinar los efectos de dispersión en el Nmon.

6.5. Tasa de conteo del Nmon

Una vez calculadas todas las tasas de conteo del Nmon, descontando los runs que presentaban incidencias, se encuentra una tasa promedio de 54,29 (cuentas/s) que, con una desviación estándar asociada del 3,84 %, puede considerarse razonablemente constante (Ver Figura 22).

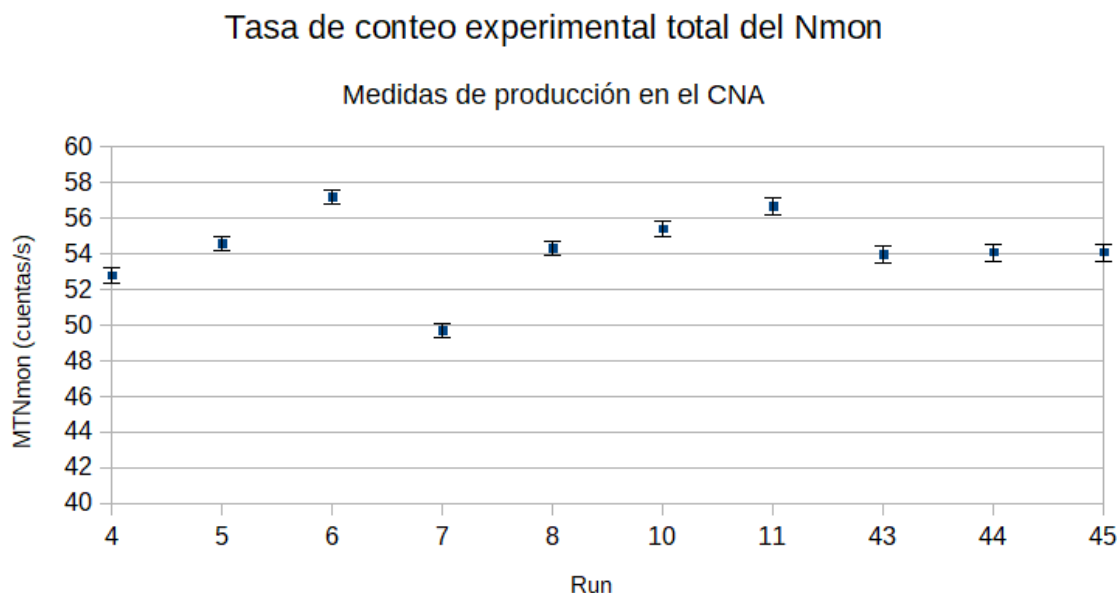


Figura 22. Tasa de conteo del Nmon para cada run

Estos son los datos experimentales de la tasa de conteo total del Nmon que se utilizan para la normalización de la tasa del Amon a la del Nmon.

6.6. Medidas de producción con normalización a la tasa del Nmon

6.6.1. Tasas de conteo normalizadas en función de la distancia al blanco

Se procede a la normalización de la tasa del Amon con la del Nmon, teniendo en cuenta las ecuaciones Ec. 13, Ec. 14 y Ec. 15, resultando la primera parte de la Tabla 21. Finalmente, considerando la Ec. 18 y la Ec. 19, se encuentran las tasas de conteo netas experimentales, de la fuente, normalizadas al Nmon y su error asociado, en la segunda parte de la Tabla 21.

D	MAmon _T / MNmon _T		MAmon _{sc} / MNmon _T		Mneta _{exp}	
	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error
(cm)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)
100	1,398	0,014	1,002	0,011	0,396	0,018
125	1,150	0,014	0,923	0,012	0,227	0,018
150	1,027	0,012	0,846	0,009	0,181	0,015
200	0,834	0,01	0,724	0,009	0,110	0,013

Tabla 21. Tasas normalizadas y tasas netas de la fuente

Como se ha comentado anteriormente, en el run 42, que corresponde a la medida a 200 cm con cono de sombra, se anotó una incidencia, pues las tasas de conteo tanto del Amon como del Nmon son menores. No obstante, al normalizar la tasa del primer monitor a la del segundo, esta incidencia se ve simplificada, pues los dos detectores debían estar afectados por igual. Aun así, no se sabe a qué se debía deber tal incidencia.

6.6.2. Tasas de conteo normalizadas en función de la posición angular

Seguidamente, se procede a la normalización de la tasa del Amon con la del Nmon para la caracterización en función de la posición angular. Teniendo en cuenta las ecuaciones Ec. 13, Ec. 14 y Ec. 15, resulta la primera parte de la Tabla 22. Finalmente, considerando la Ec. 18 y la Ec. 19, se encuentran las tasas de conteo netas experimentales, de la fuente, normalizadas al Nmon y su error asociado, en la segunda parte de la Tabla 22.

Áng.	MAmon _T / MNmon _T		MAmon _{SC} / MNmon _T		Mneta _{exp}	
	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error
(°)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)	(Un. Arb.)
0	1,815	0,018	1,138	0,011	0,677	0,021
30	1,398	0,014	1,002	0,011	0,396	0,018
60	1,083	0,011	1,060	0,014	0,023	0,017

Tabla 22. Tasas normalizadas y tasas netas de la fuente

Debido a que en el run 9, realizado con el Amon a 60° y con cono de sombra, éste último tapaba parte del haz que veía el Nmon, la tasa de conteo a 60° resulta significativamente menor.

6.6.3. Estimación de la fracción de conteo debida a la dispersión en el detector Nmon

Como ya se ha mencionado anteriormente, durante las mediciones experimentales, no se realizó una medida de la fracción de conteo por dispersión en el detector Nmon (α_{Nmon}). No obstante, α_{Nmon} puede ser estimada a partir de los datos experimentales, asumiendo que las estimaciones teóricas obtenidas en el Capítulo 5 son una buena descripción de las tasas de conteo durante el experimento. Es decir:

$$\frac{MSAmon}{MSNmon} = \frac{MnetaAmon}{MnetaNmon} \quad (\text{Ec. 28})$$

Tomando la Ec. 9 para Nmon:

$$\frac{MSAmon}{MSNmon} = \frac{MnetaAmon}{(1 - \alpha_{Nmon}) \times MTNmon} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$(1 - \alpha_{Nmon}) = \frac{MnetaAmon}{MTNmon} \times \frac{MSNmon}{MSAmon} \quad (\text{Ec. 30})$$

Entonces, a partir de la Ec. 30, se calcula un factor de conteo por dispersión asociado al Nmon para las medidas correspondientes a la caracterización de la tasa de conteo en función de la distancia, resultando la Figura 23, donde se observa que $(1 - \alpha_{Nmon})$ se muestra razonablemente constante alrededor de 0,21, resultando una fracción de conteo por dispersión α_{Nmon} del 79% (ver Tabla 23), valor razonable comparándolo con los valores de la fracción de conteo por dispersión encontrados en la Sección 6.4 en el Amon.

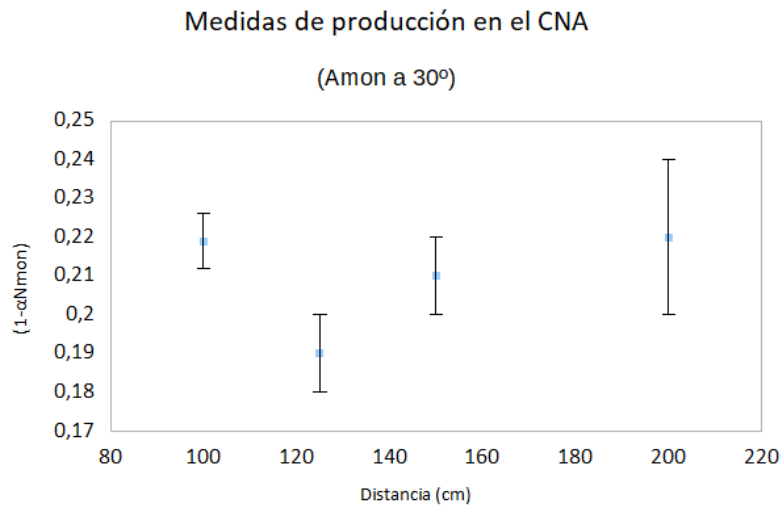


Figura 23. Valores de $(1 - \alpha_{Nmon})$ resultantes de la Ec. 30 para el conjunto de medidas en función de la distancia

	(1-alfa)	alfa
Valor	0,21	0,79
Error	0,005	0,005

Tabla 23. Fracción de conteo por dispersión

6.6.4. Tasas de conteo normalizadas en función de la distancia al blanco, corregidas a los efectos de dispersión y comparadas con estimaciones teóricas

Así pues, finalmente, con un 79% de dispersión en el N_{mon} , las tasas de conteo experimentales corregidas (ver Tabla 24), son similares a las teóricas y describen de manera apropiada la forma de la curva teórica, siguiendo la ley $1/r^2$ (ver Figura 24).

Distancia	MSAmon/MSNmon	Mnetaexp_cor	
(cm)	(Un. Arb.)	Valor	Error
100	1,82	1,89	0,10
125	1,20	1,08	0,09
150	0,85	0,86	0,07
200	0,49	0,52	0,06

Tabla 24. Comparación tasa experimental con teórica en función de la distancia al blanco

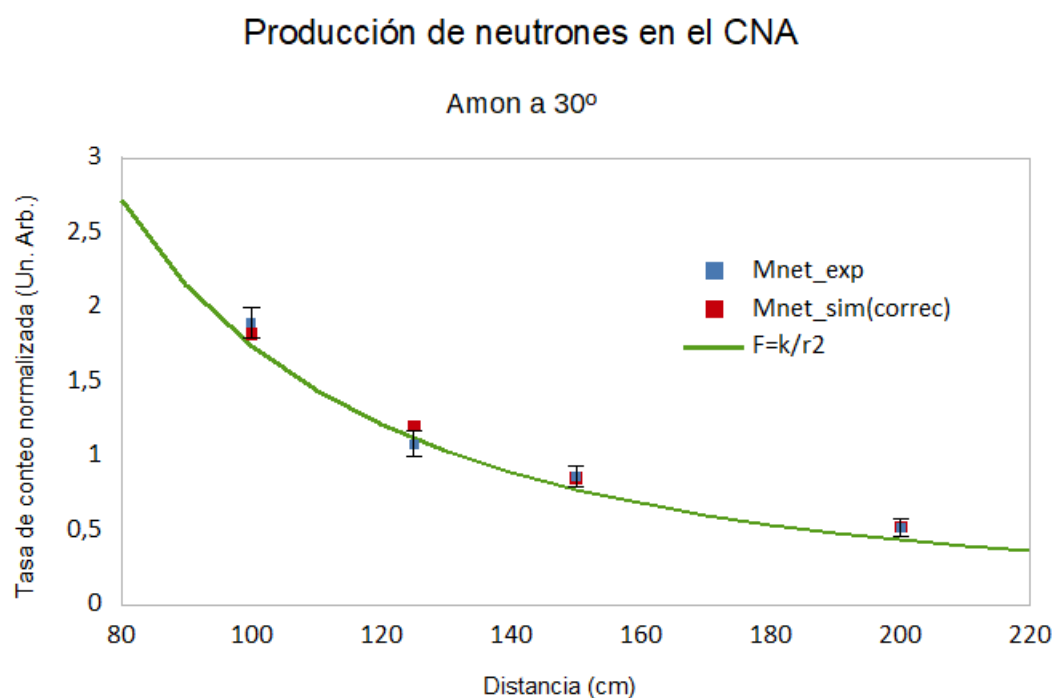


Figura 24. Comparación tasa de conteo experimental – tasa de conteo teórica, en función de la distancia

6.6.5. Tasas de conteo normalizadas en función de la posición angular, corregidas a los efectos de dispersión y comparadas con estimaciones teóricas

Se realiza el mismo procedimiento que en la sección anterior para comparar las tasas de conteo teóricas con las experimentales corregidas a los efectos de dispersión en el Nmon.

Los resultados se presentan en la Tabla 25 y en la Figura 25. Debido a la incidencia relacionada con el run 9, se observa que la medida a 60° se desvía significativamente del valor teórico. A pesar de esto, se concluye que los datos experimentales muestran una tendencia en acuerdo con las estimaciones teóricas de producción.

Ángulo (cm)	MSAmon/MSNmon (Un. Arb.)	Mnetaexp_cor	
		Valor	Error
0	3,26	3,22	0,13
30	1,82	1,89	0,10
60	0,72	0,11	0,08

Tabla 25. Comparación tasa experimental con teórica, caracterización angular

Producción de neutrones en el CNA

Amon a 100 cm

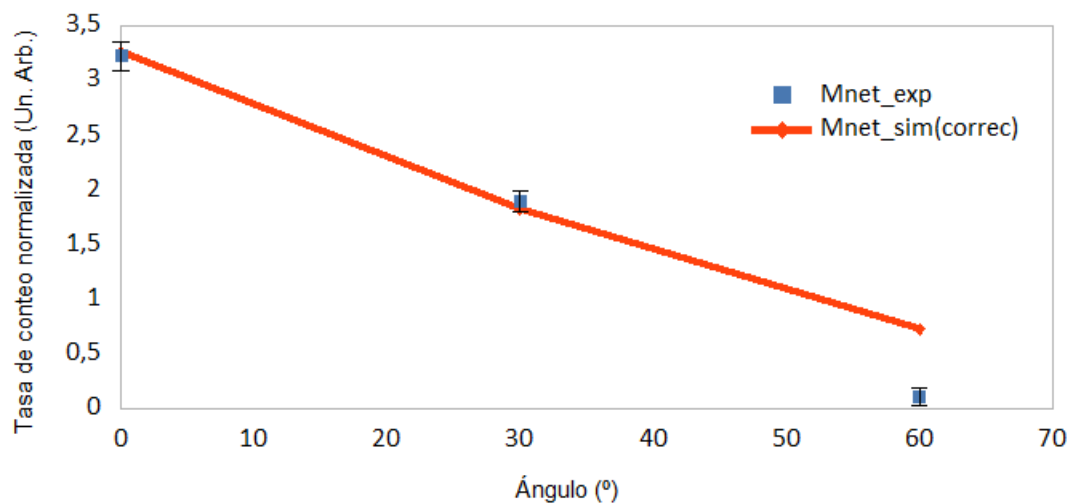


Figura 25. Comparación tasa de conteo experimental – tasa de conteo teórica, caracterización angular

6.7. Medidas de producción con normalización a la corriente

6.7.1. Tasas de conteo del Nmon corregidas a los efectos de dispersión

Una vez encontrada la corriente experimental asociada a cada medida (Capítulo 4, Sección 4), se procede al cálculo de la tasa de conteo del Nmon normalizada a dicha corriente experimental y corregida a la componente de dispersión del 79 % encontrada en la Sección 6.6.3, con las ecuaciones Ec. 4, Ec. 16 y Ec. 17, (Ver Tabla 26).

Run	MNmonT,I_cor	
	(n / (s μA))	
	Valor	Error
4	55,38	1,39
5	54,78	1,38
6	58,51	1,48
7	52,81	1,32
8	55,15	1,38
9	46,72	1,19
10	54,30	1,36
11	55,64	1,41
42	36,99	0,93
43	56,08	1,42
44	56,05	1,43
45	55,53	1,41

Tabla 26. Tasa de conteo del Nmon normalizada a la corriente

Al graficar los valores encontrados, excluyendo las medidas correspondientes a los runs 9 y 42 (Ver Figura 26), se observa que, con una media de 55,42 cuentas/(s μ A) y una desviación estándar del 2,62 % (menor a la encontrada en la Sección 6.5, cuando se observó la tendencia de la tasa del Nmon sin normalización a la corriente), los valores se pueden considerar razonablemente constantes. Estos resultados son consistentes con condiciones estables en el haz de producción y lo esperable del detector Nmon como monitor fijo.

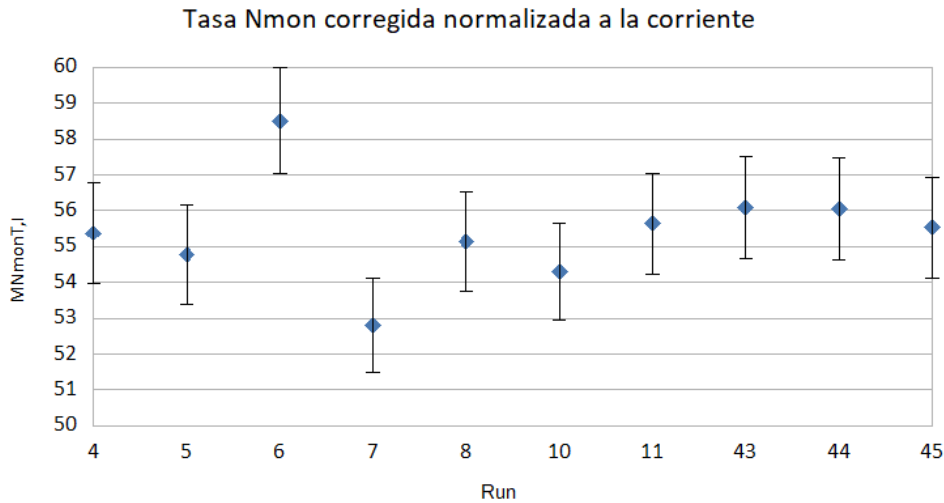


Figura 26. Tendencia de la tasa del Nmon normalizada a la corriente

No obstante, la tasa de conteo encontrada experimentalmente (55,42 cuentas/(s μ A)) no corresponde con la teórica (38 cuentas/(s μ A)). Asumiendo que las estimaciones teóricas son correctas, una posible explicación a la diferencia de conteo entre las tasas teóricas y las experimentales sería suponer que la corriente de normalización experimental es proporcional a la corriente efectiva del blanco de producción. Esto es:

$$I_{eff} = \beta \times I_{exp} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$MSN_{mon, I} = \frac{MN_{monT_cor}}{I_{eff}} = \frac{MN_{monT_cor}}{\beta \times I_{exp}} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$\beta = \frac{MN_{monT, I}}{I_{exp}} \times \frac{1}{MSN_{mon, I}} \quad (\text{Ec. 33})$$

Así pues, se calcula para cada run, descartando los que presentan incidencias, el valor de β , esto es, el factor de corrección de la corriente, y se grafica en la Figura 27. De ésta se

observa que el factor de corrección de la corriente de cada run sigue una tendencia razonablemente constante.

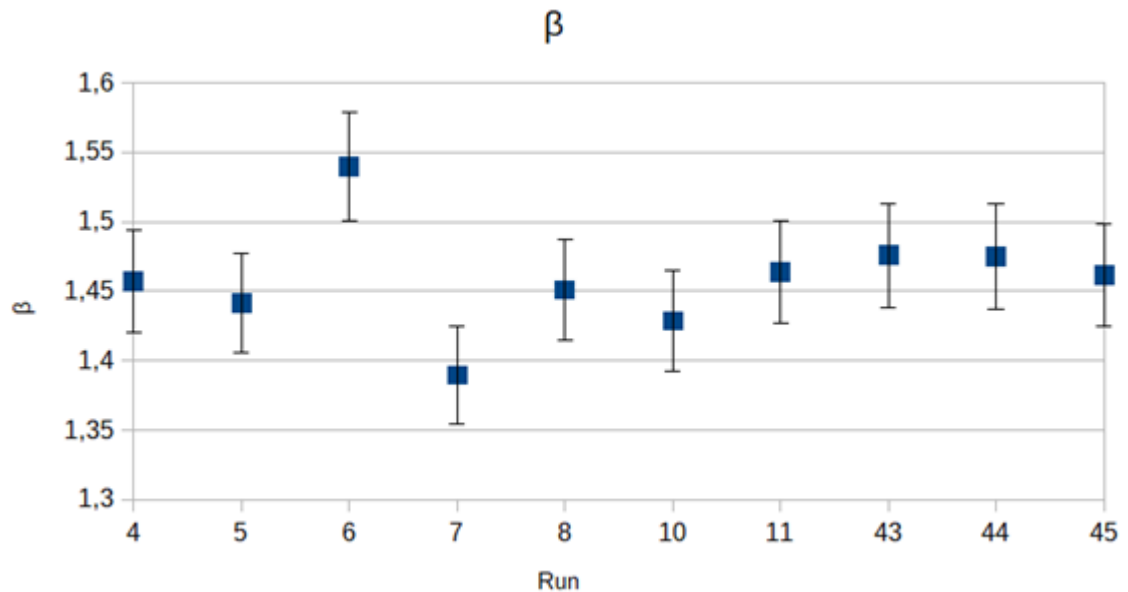


Figura 27. Factor de corrección β asociado a cada run

A continuación, se calcula el valor promedio ponderado del factor de corrección que resulta de 1,46 con un error asociado del 1 %. Con este valor, se procede a calcular los valores de la corriente efectiva (Ver Tabla 27) y a analizar las medidas de producción en función de la distancia y las medidas de producción en función de la posición angular.

La introducción de este factor de ajuste requiere ser justificada a nivel técnico y de operación del acelerador.

Run	I _{eff}	
	(μA)	
	Valor	Error
4	0,292	0,002
5	0,306	0,002
6	0,3	0,002
7	0,288	0,002
8	0,302	0,002
9	0,315	0,002
10	0,313	0,002
11	0,312	0,002
42	0,295	0,002
43	0,295	0,002
44	0,296	0,002
45	0,299	0,002

Tabla 27. Valores de la corriente efectiva

6.7.2. Medidas de producción en el Amon y comparación con las simuladas

Se utilizan las ecuaciones Ec. 4, Ec. 16 y Ec. 17 para encontrar los valores de la tasa de conteo neta del Amon normalizada a la corriente efectiva y se comparan con las tasas de conteo teóricas, tanto para las medidas de producción en función de la distancia (Tabla 28), (Figura 28) como para las medidas de producción en función de la posición angular (Tabla 29), (Figura 29).

Amon		MAmonneta		MSAmon
Distancia	Ángulo	Valor	Error	Valor
(cm)	(°)	(cuentas / (s μ A))		(cuentas / (s μ A))
100	30	93,96	3,1	69,09
125	30	39,28	2,98	45,65
150	30	36,98	2,5	32,34
200	30	65,25	1,97	18,76

Tabla 28. Tasas de conteo normalizadas a la corriente, caracterización en función de la distancia

Producción de neutrones en el CNA

(Amon a 30°)

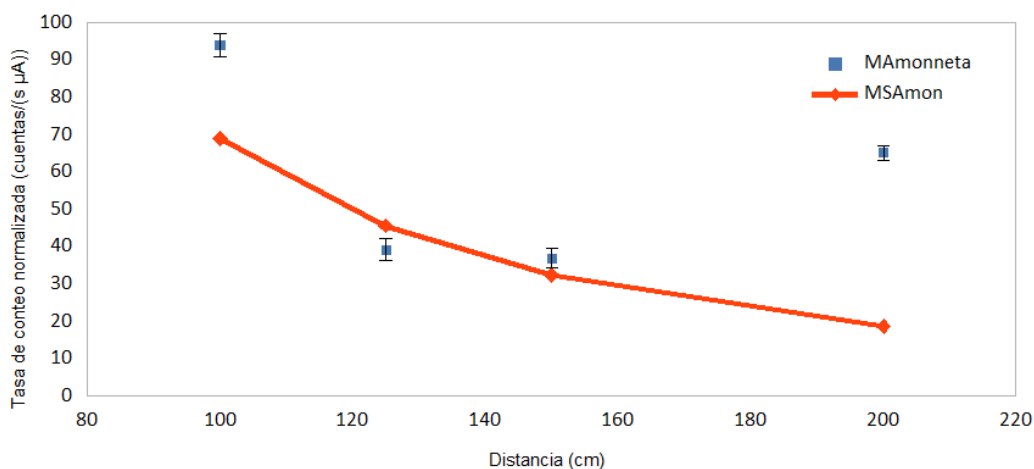


Figura 28. Comparación tasas de conteo experimentales – teóricas, caracterización en función de la distancia

Amon		MAmonneta		MSAmon
Distancia	Ángulo	Valor	Error	Valor
(cm)	(°)	(cuentas / (s μ A))		(cuentas / (s μ A))
100	0	124,8	3,68	123,78
100	30	93,96	3,1	69,09
100	60	33,33	2,62	27,29

Tabla 29. Tasas de conteo normalizadas a la corriente, caracterización angular

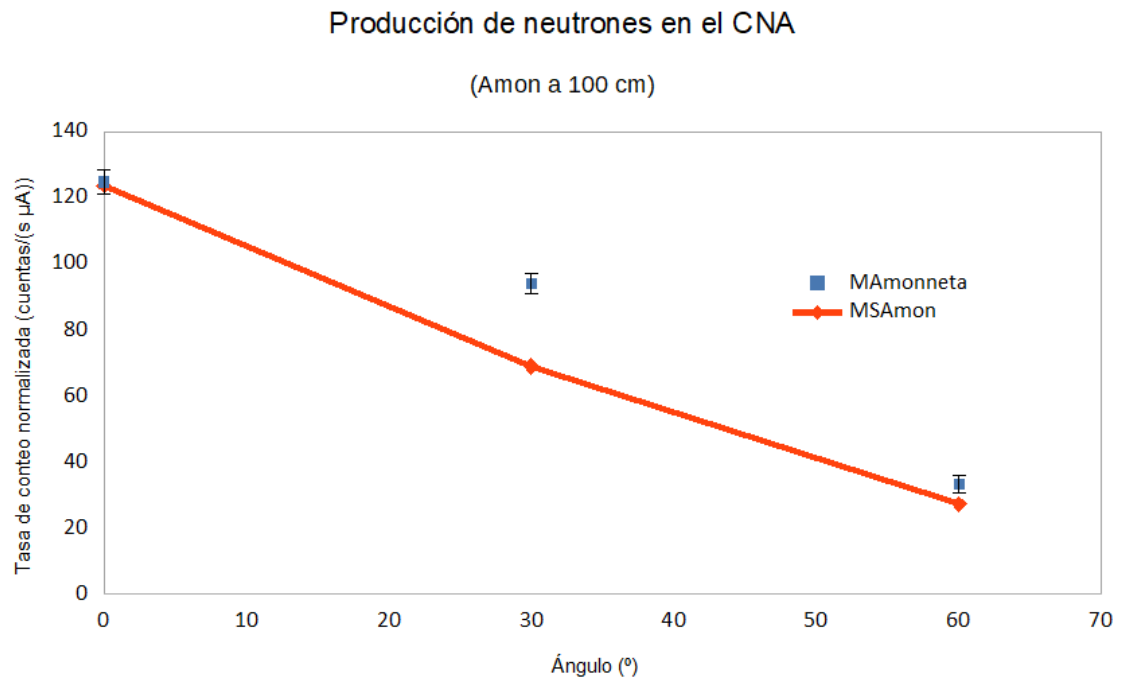


Figura 29. Comparación tasas de conteo experimentales – teóricas, caracterización angular

A 200 cm se encuentra la incidencia comentada asociada al run 42, pero el resto de la base de datos se encuentra sin incidencias detectadas, pues la incidencia del run 9 tan solo afectaba al Nmon. No obstante, en ambos casos se observa que la hipótesis de utilizar el factor de corrección en la corriente no es suficiente para que los datos experimentales describan de manera apropiada la forma de la curva teórica, pues no se logran ajustar todos los puntos.

Este análisis pone de manifiesto la dificultad de estimar tasas de conteo absolutas con las medidas de corriente en el setup actual.

7. Planificación, coste e impacto del proyecto

7.1.1. Planificación

Las tareas a realizar vienen pautadas en una planificación semanal que se planteó al inicio del trabajo y que se fue confeccionando en el transcurso de éste, (véase la carta Gantt adjunta en la Figura 30). Se fue anotando también el tiempo requerido para cada actividad, con el objetivo de poder calcular, a continuación, un coste estimado del proyecto.

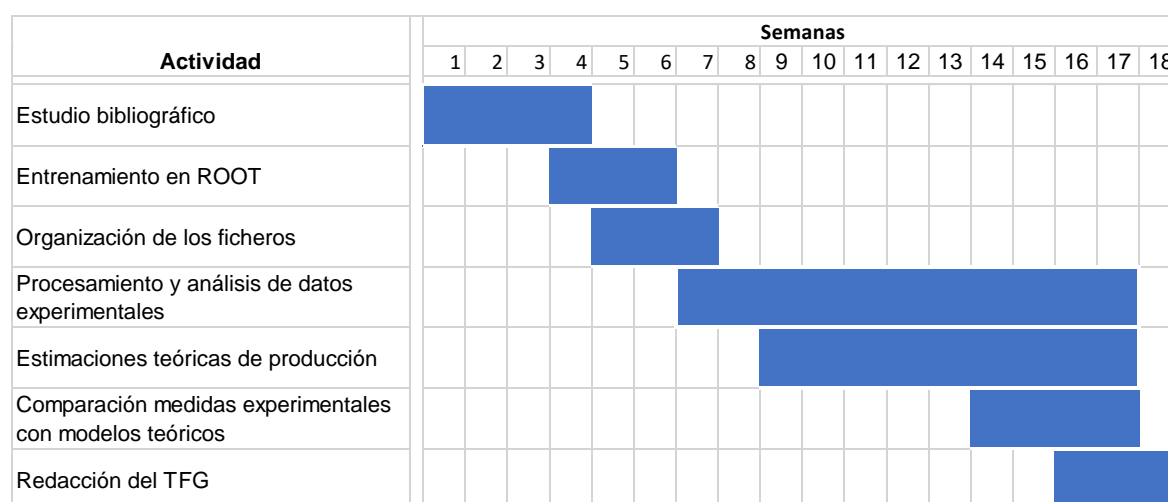


Figura 30. Carta Gantt, planificación del proyecto

Tal y como se observa en la Figura 30, las actividades fueron catalogadas en siete fases. Las seis primeras se explican en el Capítulo 2, Sección 8, mientras que la última corresponde con la recapitulación del análisis y el redactado del trabajo, junto con las conclusiones obtenidas.

7.1.2. Coste

El trabajo requirió de un total de 308 horas. En la Tabla 30 se muestra cuántas horas se dedicaron a cada actividad y una estimación del coste total del trabajo, tomando como coste por hora la cifra 8 euros la hora. Así, resulta un coste total del proyecto de 2.464 €.

Actividad	Tiempo dedicado (h)
Estudio bibliográfico y entrenamiento en ROOT	42
Organización de los ficheros	21,5
Procesamiento y análisis de datos experimentales, estimaciones teóricas y comparacion de éstas con las medidas experimentales	154,5
Redacción del TFG	90
Total horas	308
Coste/hora (€/h)	8
Coste total (€)	2464

Tabla 30. Tiempo dedicado al trabajo y coste total del proyecto

7.1.3. Impacto medioambiental

El CNA es una instalación autorizada por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Por tanto, tiene y debe tener implementados los protocolos de seguridad radiológica. De hecho, el CSN mantiene un control riguroso de las actividades que allí se desarrollan [ELP17]. Realizan dos visitas a esta instalación cada año, donde se comprueba la seguridad de las instalaciones, se realizan medidas de los niveles de radiactividad y se revisa in situ la documentación generada por el centro.

Se debe destacar también que las paredes del acelerador Tándem tienen entre uno y dos metros de grosor y todos los trabajadores del centro llevan un dosímetro o medidor de radiactividad al que no se le escapa ningún rayo alfa, beta o gamma que pueda recibir.

Conclusiones y recomendaciones

En primer lugar, se concluye que la primera campaña de caracterización del haz de neutrones rápidos producidos por la fuente Hispalis en el CNA fue exitosa. Pues el montaje experimental de los detectores (Amon y Nmon) del grupo de Física Nuclear experimental de la UPC funciona apropiadamente, pues se pudieron medir neutrones con éxito y el monitor fijo Nmon sí sirve como monitor de normalización.

También, se concluye que se ha realizado un análisis exitoso de los datos experimentales recogidos durante la primera campaña. Se crearon rutinas para el procesamiento y automatización del análisis y, a pesar de que se identificasen algunas incidencias en los datos, se han acabado determinado exitosamente las tasas de conteo totales y netas para ambos monitores de neutrones usados durante la medición.

En relación a la instalación, se concluye que no presenta un fondo de radiación natural preocupante, pues el conteo de fondo detectado por los detectores Amon y Nmon es de unas 0,04 cuentas/s, valor de tres órdenes de magnitud menor que las fluctuaciones de las tasas de conteo registradas cuando existe producción de neutrones en el blanco. También se concluye que las medidas de producción de neutrones están dominadas por los efectos de dispersión. En el caso del Amon, cuando se sitúa a 30° , la fracción de conteo por dispersión tiene una tendencia creciente en la medida que el detector se aleja del blanco y se acerca a la pared, pasando del 62 % al 80 %. Cuando el Amon se sitúa a 100 cm y a 0° la fracción de conteo por dispersión es del 65 % y cuando se sitúa también a 100 cm pero a 60° es del 86 %. En el Nmon no se utilizó un cono de sombra para determinar las medidas de dispersión, debido a ello se estimó una fracción de conteo por dispersión del 79 %, valor razonable comparándolo con los valores anteriores pero que debe ser verificado experimentalmente.

De las comparaciones entre las tasas de conteo netas y las estimaciones teóricas se concluye que para las mediciones normalizadas al detector fijo (Nmon) las curvas experimentales son consistentes con las estimaciones teóricas al introducir las correcciones apropiadas por efectos de dispersión en el monitor fijo. Para la normalización a la corriente, los resultados experimentales muestran inconsistencias en relación a las estimaciones teóricas. Así pues, se requieren estudios posteriores para entender el origen de estas inconsistencias y entender apropiadamente la relación entre la corriente y la producción de neutrones.

A partir del presente trabajo se realizan las siguientes recomendaciones:

- Para futuros estudios se sugiere incorporar el medidor de corriente del haz en el

sistema de adquisición (DAQ) junto a los monitores de producción de neutrones.

- La línea Física Nuclear Básica está dirigida directamente hacia las paredes del búnker experimental, encontrándose éstas muy próximas al blanco. Esto tiene como resultado que la componente debida a la dispersión (scattering) domina significativamente sobre la componente neta de neutrones producidos en la fuente. Este hecho impone limitaciones en las posibles aplicaciones de la línea de neutrones rápidos del CNA para física básica o calibración de instrumentación. Así pues, se recomienda evaluar alternativas que permitan reducir los efectos de dispersión en la línea experimental.
- La producción de neutrones en el blanco puede ser determinada apropiadamente a través del uso de un detector de referencia de características similares a Nmon. Para futuras mediciones en el CNA se recomienda un montaje experimental incorporando un monitor fijo. La lectura de este monitor debe ser corregida apropiadamente por los efectos de dispersión en la sala experimental.
- Se recomienda el desarrollo de una versión mejorada del detector Nmon, incorporando un shielding exterior, con el objeto de reducir el conteo por dispersión en este monitor.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes personas que me han ayudado a llevar a cabo este trabajo:

En primer lugar y especialmente a Ariel Esteban Tarifeño Saldivia por todo su apoyo, ánimo y tantas horas invertidas en escucharme, guiarme, enseñarme y ayudarme. A cualquier hora o en cualquier momento. Muchas gracias.

A Francisco Calviño Tavares por animarme desde el principio orientándome sobre toda la complejidad a la que me iba a enfrentar. Clarificándome y explicándome la base para poder empezar con este proyecto.

A Begoña Fernández y Carlos Guerrero, por todos los emails contestando nuestras preguntas.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [AGR09] J.Agramunt et al. *Nucl. Inst. Meth. A* 807 (2016) pp. 69-78.
- [ATJ15] A. Tarifeño-Saldivia et. al., *Journal of Instrumentation* 12 (2017) P04006.
- [ATP14] A. Tarifeño-Saldivia et. al., PoS(XLASNPA)068, 2013.
- [CNA01] Centro Nacional de Aceleradores. Cnauses. 2018. Disponible en: <http://cna.us.es/>.
- [DiS07] Dietrich Schlegel, "*TARGET user's manual*", Laborbericht PTB-6.42-05-2, Braunschweig (2005).
- [DSB06] D. Schlegel-Bickman, G. Dietze, H. Schölermann, *A collimator system for fast neutron scattering experiments*, *Nucl. Instr. And Meth.* 169 (1980) pp. 517-526.
- [ELP17] E. López Palma. *El Centro Nacional de Aceleradores, una instalación científica que resuelve problemas cotidianos*. Revista de seguridad nuclear y protección radiológica, alfa, número 18, tercer trimestre 2012 pp. 21-25.
- [GE413] Geant4. Disponible en: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>.
- [GFK08] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. Wiley, New York, NY, 1979.
- [IAEA04] IAEA homepage, <http://www-nds.iaea.org/ndspub/libraries/drosg2000/>.
- [IFIC10] IFIC, Institut de Física Corpuscular. Disponible en: <http://webific.ific.uv.es/web/>.
- [ISO12] ISO. *Reference neutron radiations – Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field*. ISO 8529-2. ISO (2001).
- [JFZ16] J. F. Ziegler and J. P. Biersack, SRIM-2008. Available from <http://www.srim.org>.
- [MDO03] M. Drosg and O. Schwerer, *Production of monoenergetic neutrons between 0.1 and 23 MeV*, Handbook on nuclear activation data, IAEA-tech. reports series no. 273 (1987) pp. 83-162.

[MDr02] M. Drosig, *Characteristics of accelerator based neutron sources*, Institute of Experimental Physics, University of Vienna, A-1090 Wien, p.21.

[NEU05] Evert Birgersson and Göran Lövestam. *NeuSDesc neutron source description software manual*. Technical report, 2009.

[ROOT11] ROOT, Data Analysis Framework. Disponible en: <https://root.cern.ch/>.

Bibliografía complementaria

[1] John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta. *Introduction to Nuclear Engineering*. Third Edition. Prentice Hall.

[2] Louis Lyons. *Statistic for nuclear and particle physicists*. Cambridge University Press.

[3] Naeem Ahmed. *Physics and Engineering of Radiatoin Detection*. Academic Press.

[4] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Second revised edition. Springer-Verlag.

ANEXO

Anexo 1. Atenuación del aire

Los neutrones emitidos por la fuente son atenuados por reacciones nucleares con el aire. Esta atenuación aumenta aproximadamente de forma lineal con la distancia fuente-detector y la única contribución significativa a ella es la dispersión del oxígeno y el nitrógeno.

El factor de atenuación del aire (F_A) viene dado por la ecuación (Ec. A1) para las condiciones ambientales: temperatura 21 °C, presión 100,4 kPa, humedad 50 %.

$$F_A(l, E) = \exp[l \Sigma(E)] \quad (\text{Ec. A1})$$

Donde:

l : es la distancia, en centímetros, desde el centro de la fuente hasta el centro del dispositivo.

Σ : es el coeficiente de atenuación lineal obtenido promediando las secciones transversales de neutrones totales para nitrógeno y oxígeno sobre la distribución de neutrones espectrales de la fuente. Para una fuente de neutrones de “ ^{252}Cf spontaneous fission”, con una energía de 2,13 MeV, este coeficiente es de $1.055 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$, mientras que para una de $^{241}\text{AmBe}(\alpha, n)$, con una energía de 4,4 MeV, es de $890 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$.

Debido a que el rango de energías del presente trabajo se encuentra entre estos dos valores, se procede a realizar la Tabla A1 para comprobar la tendencia del factor de atenuación del aire entre ambas fuentes y a las distancias experimentales.

La longitud del Amon es de 32 cm, así pues, del centro del detector a su cara frontal hay 16 cm. La longitud del Nmon es de 44 cm, siendo la distancia del centro del dispositivo a su cara frontal de 22 cm en este caso.

l (cm)	$\Sigma (10^{-7} \text{ cm}^{-1})$		F_A		Incremento	
	²⁵² Cf	²⁴¹ AmBe	²⁵² Cf	²⁴¹ AmBe	²⁵² Cf	²⁴¹ AmBe
116	1055	890	1,012	1,010	-	-
141	1055	890	1,015	1,013	0,26%	0,22%
166	1055	890	1,018	1,015	0,26%	0,22%
216	1055	890	1,023	1,019	0,53%	0,45%
322	1055	890	1,035	1,029	1,12%	0,95%

Tabla A1. Factor de atenuación del aire

Debido a que el factor de atenuación calculado, F_A , es próximo a uno y que, como máximo, se encuentra un incremento del 1,12%, no se contemplan los efectos de dicho factor en el análisis de datos experimentales.

Anexo 2. Runbook realizado en Excel

FECHA	RUN #	DAQ	START	STOP	FC3 (uA)	Integr. (nA)		Dosim. (uSv/h)	DESCRIPCIÓN	Comentarios sobre los resultados online
6-7-16	1	IFIC	11:34	11:44	-	-	1,01	-	EJ-calib Co60	OK
6-7-16	2	IFIC	11:45	11:54	-	-	1,01	-	EJ-calib Cs137	OK
6-7-16	3	IFIC	12:22	12:30	-	-	1,01	-	EJ-calib Cf252	tuneando discriminacion DAQ-IFIC
6-7-16	4	IFIC	12:50	13:00	2,5	200	1,01	12	aMon 0°, 1m, sin cono	
6-7-16	5	IFIC	13:37	13:47	1,1	210	1,01	13	aMon 0°, 1m, CON cono@8cm	En aMon, el 66% es indirecto
6-7-16	6	IFIC	14:07	14:17		210	1,01	12	aMon 30°, 1m, sin cono	
6-7-16	7	IFIC	14:44	14:55	0,9	190	1,01	12,6	aMon 30°, 1m, CON cono@8cm	En aMon, el 70% es indirecto
6-7-16	8	IFIC	15:05	15:15	1	205	1,01	12,4	aMon 60°, 1m, sin cono	
6-7-16	9	IFIC	15:25	15:32	1	215	1,01	12,1	aMon 60°, 1m, CON cono@8cm	El cono tapa parte del haz que ve el nMon, por eso los ratios no paracen tener sentido.
6-7-16	10	IFIC	15:45	15:53	1	215	1,01	13	aMon 30°, 150cm, CON cono@16cm	
6-7-16	11	IFIC	16:01	16:08	1	215	1,01	13	aMon 30°, 150cm, SIN cono	En aMon, el 81% es indirecto
6-7-16	31	CIEMAT IFIC	18:24	18:34	1	210	1,01	?	ST (1m, 0°) y p- recoil (0.5m, 60°) y D1(7x7cm)	
6-7-16	32	CIEMAT IFIC	18:49	19:04	1	210	1,01	13	ST (1m, 0°) y p- recoil (0.5m, 60°) y D1(7x7cm) [umbral p-recoil reducido]	
6-7-16	33	CIEMAT IFIC	19:13	19:45	1	198	1,01	11	ST (1m, 30°) y D1(4.5x4.5cm)	
6-7-16	34	CIEMAT IFIC	19:48	20:06	1	195	1,01	12	ST (1m, 45°) y D1(0x0cm)	
6-7-16	35	CIEMAT IFIC	20:20	20:40	1	195	1,01	12	ST (1m, 60°) y D1(18x18cm)	
7-7-16	36	CIEMAT IFIC					1,01		ST + EJ calibraciones	
7-7-16	37	CIEMAT IFIC					1,01		ST + EJ calibraciones	
7-7-16	38	CIEMAT IFIC					1,01		ST + EJ calibraciones	

7-7-16	39	CIEMAT IFIC	9:44	10:04	1,32	200-220	1,01	15	ST (1m, 60°)+CONE2(a22cm) y D1(22x22cm)	
7-7-16	40	CIEMAT IFIC	10:22			180	1,01		ST (1m, 0°)+CONE2(a22cm) y D1(22x22cm)	
7-7-16	41	CIEMAT IFIC	11:46	11:48		195	1,01		aMon (2m, 30°) CON cono + ST(1m, 90°) + D1 (5m, 100°)	No usar: aMon si tensión
7-7-16	42	CIEMAT IFIC	11:55	12:00		195	1,01		aMon (2m, 30°) CON cono + ST(1m, 90°) + D1 (12x12cm, 5m, 100°)	
7-7-16	43	CIEMAT IFIC	12:05	12:56		200	1,01		aMon (2m, 30°) SIN cono + ST(1m, 90°) + D1 (7x7cm, 5m, 100°)	
7-7-16	44	CIEMAT IFIC	12:25	12:30		200	1,01	12	aMon (1,25m, 30°) CON cono@30cm + ST(1m, 90°) + D1 (4,5x4,5cm, 5m, 100°)	
7-7-16	45	CIEMAT IFIC	12:36	12:42		205	1,01	13	aMon (1,25m, 30°) SIN cono + ST(1m, 90°) + D1 (0x0cm, 5m, 100°)	
7-7-16	46	CIEMAT IFIC	12:49	12:57		205	1,01	12	aMon (1,25m, 30°) sin cono + ST(1m, 90°) + D1 (18x18cm, 5m, 100°) [sin nMon]	
7-7-16	47	CIEMAT IFIC	13:03	13:10		210	1,01		aMon (1,25m, 30°) sin cono + ST(1m, 90°) + D1 (22x22cm, 5m, 100°) [sin nMon]	
7-7-16	48	CIEMAT IFIC	13:29	13:33		220	1,01		EJ309 -45°, STB 90, SP2 a 25 cm y 0°	
7-7-16	48	CIEMAT IFIC	13:39	14:10		215	1,01		EJ309 -45°, STB 90, SP2 a 25 cm y 0°	
7-7-16	49	CIEMAT IFIC	14:25	14:55		220	1,01	15	EJ309 -45°, STB 90, SP2 a 25 cm y 60°	
7-7-16	50	CIEMAT IFIC	15:31	15:36		180	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	
7-7-16	51	CIEMAT IFIC	15:37	16:07		190	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	
7-7-16	52	CIEMAT IFIC	16:20	16:25		220	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 0 S. Cone d=1m	

7-7-16	53	CIEMAT IFIC	16:28	17:07		235	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 0 S. Cone d=1m	
7-7-16	54	CIEMAT IFIC	17:08	17:10		240	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 60 d=1m	
7-7-16	55	CIEMAT IFIC	17:12	17:38		220	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 60 d=1m	
7-7-16	56	CIEMAT IFIC	17:48	17:52		220	0,506	7,6	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 60 S. Cone d=1m	
7-7-16	57	CIEMAT IFIC	15:53	18:20		225	0,506	8	Ed=0.5 MeV EJ309 -45°, STB 60 S. Cone d=1m	
7-7-16	58	CIEMAT IFIC	18:46	18:49		200	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	
7-7-16	59	CIEMAT IFIC	18:56	19:01		220	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	
7-7-16	60	CIEMAT IFIC	19:03	19:08			2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	
7-7-16	61	CIEMAT IFIC	19:10	19:11			2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	
7-7-16	62	CIEMAT IFIC	19:20	19:25			2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 d=1m	fondo
7-7-16	63	CIEMAT IFIC	19:29	19:34		200	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 SC d=1m	
7-7-16	64	CIEMAT IFIC	19:34	19:39			2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 SC d=1m	
7-7-16	65	CIEMAT IFIC	19:40	19:45		240	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 SC d=1m	
7-7-16	66	CIEMAT IFIC	20:01	20:06		220	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 0 PERP d=1m	
7-7-16	66	CIEMAT IFIC	20:18	20:23		200	2,014	46	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB60 d=1m	
7-7-16	67	CIEMAT IFIC	20:26	20:31		210	2,014	46	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB60 d=1m	
7-7-16	69	CIEMAT IFIC	20:41	20:46		210	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 60 SC d=1m	
7-7-16	69	CIEMAT IFIC	20:46	20:51		210	2,014	59	Ed=2 MeV EJ309 -45°, STB 60 SC d=1m	
7-7-16	70	CIEMAT IFIC	20:51	21:08					EJ309 -45°, STB 60 SC d=1m	Decay de activacion
7-7-16	71	CIEMAT IFIC	21:14	21:20					Calib EJ309 Co60, STB Cs137	Calibracion
7-7-16	72	CIEMAT IFIC	21:22						Calib EJ309 Cs137, STB Co60	Calibracion

Anexo 3. Organización de los ficheros experimentales

Fecha	Hora inicio	Hora fin	Run	Nmon	D (cm)	Ang (°)	Amon	D (cm)	Ang (°)	Cono	Archivo	Observaciones
05/07/2016	?	19:39	i	Si	300	52,5	Si	100	0	sin	201607051939_bck.root	Medida de fondo, background
05/07/2016	20:30	9:30	ii	Si	300	52,5	Si	100	0	sin	201607052030_0930_bck_samples.root	Medida de fondo, background
06/07/2016	12:50	12:58	4	Si	300	52,5	Si	100	0	sin	16071250_1300_AMon_0grados_1m_NoShCon.root	
06/07/2016	13:37	13:46	5	Si	300	52,5	Si	100	0	con	16071337_1348_AMon_0grados_1m_ShCon_005.root	Shadow cone a 8 cm de la placa Cu
06/07/2016	14:06	14:17	6	Si	300	52,5	Si	100	30	sin	16071406_1416_AMon_330grados_1m_NoShCon.root	
06/07/2016	14:44	14:52	7	Si	300	52,5	Si	100	30	con	16071443_1455_AMon_330grados_1m_ShCon.root	Distancia detector-shadow cone de 42,5 cm
06/07/2016	15:04	15:13	8	Si	300	52,5	Si	100	60	sin	16071504_1515_AMon_300grados_1m_NoShCon.root	En el nombre pone 30° y en el logbook 60
06/07/2016	15:26	15:30	9	Si	300	52,5	Si	100	60	con	16071526_1533_AMon_300grados_1m_ShCon.root	El cono tapa parte del haz que ve el Nmon
06/07/2016	15:45	15:51	10	Si	300	52,5	Si	150	30	con	16071553_AMon_330grados_150cm_ShCon.root	Distancia detector-shadow cone de 84 cm
06/07/2016	16:01	16:06	11	Si	300	52,5	Si	150	30	sin	16071608_AMon_330grados_150cm_NoShCon.root	
06/07/2016	?	18:26	iii	Si	300	52,5	Si	?	?	sin	160706D1rearBeamandNoBeam.root	Medida de fondo, background
06/07/2016	18:27	18:37	31	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607061820D1rear7x7Matrix.root	
06/07/2016	18:49	19:04	32	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607061904D1rear12x12Matrix.root	se necesita cambiar de calibración
06/07/2016	19:14	19:39	33	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607061915D1rear4x4Matrix_033.root	
06/07/2016	19:50	20:09	34	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607061950D1rear10Matrix_034.root	
06/07/2016	20:20	20:39	35	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607062020D1rear18x18Matrix_035.root	
06/07/2016	20:20	9:42	iv	Si	300	52,5	Si	?	?	sin	1607062020D1rear18x18Matrix_Nobeam.root	Medida de fondo, background
07/07/2016	9:45	9:56	39	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607070945D1rear22x22Matrix_039.root	
07/07/2016	10:22	10:55	40	Si	300	52,5	No	-	-	-	1607071054D1rearCMatrix_bis.root	no se hizo clear online, contiene este run y el anterior
07/07/2016	11:55	12:01	42	Si	300	52,5	Si	200	30	con	1607071156_1206D1Pos212x12Matrix.root	
07/07/2016	12:05	12:13	43	Si	300	52,5	Si	200	30	sin	1607071208_1217D1Pos27x7MatrixNoShadow.root	
07/07/2016	12:25	12:30	44	Si	300	52,5	Si	125	30	con	1607071227_1234D1Pos24x4MatrixShadow.root	
07/07/2016	12:35	12:41	45	Si	300	52,5	Si	125	30	sin	16070712381243D1Pos20x0MatrixNoShadow.root	0x0=desnudo
07/07/2016	12:50	13:02	46	No	-	-	Si	125	30	sin	1607071238D1Pos218x18MatrixNoShadow_046.root	amon como monitor
07/07/2016	13:05	13:12	47	No	-	-	Si	125	30	sin	1607071305D1Pos22x22MatrixNoShadow_047.root	
07/07/2016	13:27	14:07	48	No	-	-	No	-	-	-	1607071328D1Pos22x22Matrix_048.root	

Anexo 4. Script ROOT magnitudes de interés online

```
void analysisCNA_v1(){

string input="16071250_1300_AMon_0grados_1m_NoShCon";
//string input="16071337_1348_AMon_0grados_1m_ShCon_005";
//string input="16071406_1416_AMon_330grados_1m_NoShCon";
//string input="16071443_1455_AMon_330grados_1m_ShCon";
//string input="16071504_1515_AMon_300grados_1m_NoShCon";
//string input="16071526_1533_AMon_300grados_1m_ShCon";
//string input="16071553_AMon_330grados_150cm_ShCon";
//string input="16071608_AMon_330grados_150cm_NoShCon";
//string input="1607071156_1206D1Pos21x12Matrix";
//string input="1607071208_1217D1Pos27x7MatrixNoShadow";
//string input="1607071227_1234D1Pos24x4MatrixShadow";
//string input="16070712381243D1Pos20x0MatrixNoShadow";

//Poner el nombre del archivo de entrada sin extensión .root
TFile f((input+".root").c_str());

//f.ls();
TH1F * Amon = (TH1F*)f.Get("angularMonitor_EFIR");
TH1F * Amonpuls = (TH1F*)Amon->Clone("Amonpuls");
TH1F * Amonpic = (TH1F*)Amon->Clone("Amonpic");
TH1F * Amoncal = (TH1F*)f.Get("angularMonitor_cal");
TH1F * Nmon = (TH1F*)f.Get("neutronMonitor_EFIR");
TH1F * Nmonpuls = (TH1F*)Nmon->Clone("Nmonpuls");
TH1F * Nmonpic = (TH1F*)Nmon->Clone("Nmonpic");
TH1F * Nmoncal = (TH1F*)f.Get("neutronMonitor_cal");
TH1F * Pulser = (TH1F*)f.Get("Pulser_EFIR");

double xmin= 12000;
double xmax= 76000;
double xminap= 906700;
double xmaxap= 915000;
double xminpi= 62000;
double xmaxpi= 70000;
double xminn= 38000;
double xmaxn= 230000;
double xminnp= 1003000;
double xmaxnp= 1016000;
double xminnpi= 190000;
double xmaxnpi= 220000;
double xminp= 443400;
double xmaxp= 445900;

// Calculate integral

TAxis *axisa = Amon->GetXaxis();
int bmin = axisa->FindBin(xmin);
int bmax = axisa->FindBin(xmax);
double inte = Amon->Integral(bmin,bmax);
//cout <<"Integral Amon " << inte <<endl;

//TAxis *axisap = Amonpuls->GetXaxis();
//int bminap = axisap->FindBin(xminap);
//int bmaxap = axisap->FindBin(xmaxap);
//double inteap = Amonpuls->Integral(bminap,bmaxap);
//cout <<"Integral Pulse Amon " << inteap <<endl;

TAxis *axisn = Nmon->GetXaxis();
int bminn = axisn->FindBin(xminn);
int bmaxn = axisn->FindBin(xmaxn);
```

```

double inten= Nmon->Integral(bminn,bmaxn);
//cout <<"Integral Nmon "<< inten <<endl;

TAxis *axisnpu = Nmonpuls->GetXaxis();
int bminnpu = axisnpu->FindBin(xminnpu);
int bmaxnpu = axisnpu->FindBin(xmaxnpu);
double intenpu= Nmonpuls->Integral(bminnpu,bmaxnpu);
//cout <<"Integral Pulse Nmon "<< intenpu <<endl;

TAxis *axisp = Pulser->GetXaxis();
int bminp = axisp->FindBin(xminp);
int bmaxp = axisp->FindBin(xmaxp);
double intep= Pulser->Integral(bminp,bmaxp);
//cout <<"Integral Pulser "<< intep <<endl;

// Find peak and integral Amon

double PulserLowLimit=400000.0;
double peakRatio=0.05;
double deltaPulsera=2000.0;

TSpectrum *sa = new TSpectrum(100);

int nfounda = sa->Search(Amon,10,"nobackground new",peakRatio);

TList *functionsa = Amon->GetListOfFunctions();
TPolyMarker *pma = (TPolyMarker*)functionsa->FindObject("TPolyMarker");
double* apmarrayX=pma->GetX(); // Find polymarkers position

double pulserPosA, NeutronCountsA, PicAmon;

for (int j = 0; j < nfounda; j++) {
    pulserPosA=apmarrayX[j];
    if(pulserPosA<=PulserLowLimit){
        TF1 *f1 = new TF1("f1","gaus",-5,.5);
        f1->SetParameters(1000.0, pulserPosA, deltaPulsera);
        Amon -> Fit("f1", "Q", "", pulserPosA-deltaPulsera,pulserPosA+deltaPulsera);

TAxis *axisa = Amon->GetXaxis();
int bmina = axisa->FindBin(xmina);
int bmaxa = axisa->FindBin(xmaxa);

        NeutronCountsA = Amon->Integral(bmina,bmaxa);

Amonpic->GetXaxis()->SetRangeUser(xminapi,xmaxapi);

PicAmon = Amonpic -> GetMean();

cout<<" "<<endl;
cout<<"Integral Amon: "<<NeutronCountsA<<endl;
cout<<"Amon peak 4,5 in: "<<pulserPosA<<endl;
cout<<"Amon peak MEAN in: "<<PicAmon<<endl;
cout<<" "<<endl;

        // cout<<"Amon peak in: "<<pulserPosA<<" with Neutron Counts: "<<NeutronCountsA<<endl;

    }
}

// Find peak and integral Pulser Amon

double deltaPulser=400.0;

TSpectrum *s = new TSpectrum(100);

```

```

int nfound = s->Search(Amonpuls,10,"nobackground new",0.02);

TList *functions = Amonpuls->GetListOfFunctions();
TPolyMarker *pm = (TPolyMarker*)functions->FindObject("TPolyMarker");
double* parrayX=pm->GetX(); // Find polymarkers position

double pulserPos, PulserCounts;

for (int j = 0; j < nfound; j++) {
    pulserPos=parrayX[j];
    if(pulserPos>=PulserLowLimit){
        TF1 *f1 = new TF1("f1","gaus",-5,.5);
        f1->SetParameters(1000.0, pulserPos, deltaPulser);
        Amonpuls -> Fit("f1", "Q", "", pulserPos-deltaPulser,pulserPos+deltaPulser);
        double mean = f1->GetParameter(1);
        double sd = f1->GetParameter(2);
        double Peak_o=mean-4.5*sd;
        double Peak_f=mean+4.5*sd;

        int PeakBINo= Amonpuls->GetXaxis()->FindBin(Peak_o);
        int PeakBINf= Amonpuls->GetXaxis()->FindBin(Peak_f);

        PulserCounts = Amonpuls->Integral(PeakBINo,PeakBINf);

        //cout <<"Integral Pulse Amon " << inteapu <<endl;
        cout<<"Pulser Counts Amon 4,5: " <<PulserCounts<<endl;
        cout<<"Amon Pulser Peak in: " <<pulserPos<<endl;
        cout<<" " <<endl;

        //cout<<"Amon Pulser peak in: " <<pulserPos<<" with Pulser Counts: " <<PulserCounts<<endl;

    }
}

double nRateA;
nRateA=NeutronCountsA/PulserCounts;
cout<<"Amon NRate in: " <<nRateA<<endl;

// Find peak and integral Nmon

double deltaPulserN=10000.0;

TSpectrum *sn = new TSpectrum(100);

int nfoundn = sn->Search(Nmon,10,"nobackground new",peakRatio);

TList *functionsn = Nmon->GetListOfFunctions();
TPolyMarker *pmn = (TPolyMarker*)functionsn->FindObject("TPolyMarker");
double* nparrayX=pmn->GetX(); // Find polymarkers position

double pulserPosN, NeutronCountsN, PicNmon;

for (int j = 0; j < nfoundn; j++) {
    pulserPosN=nparrayX[j];
    if(pulserPosN<=PulserLowLimit){
        TF1 *f1 = new TF1("f1","gaus",-5,.5);
        f1->SetParameters(1000.0, pulserPosN, deltaPulserN);
        Nmon -> Fit("f1", "Q", "", pulserPosN-deltaPulserN,pulserPosN+deltaPulserN);

        TAxis *axisn = Nmon->GetXaxis();
        int bminn = axisn->FindBin(xminn);
        int bmaxn = axisn->FindBin(xmaxn);
    }
}

```

```

    NeutronCountsN = Nmon->Integral(bminn,bmaxn);

Nmonpic->GetXaxis()->SetRangeUser(xminnpi,xmaxnpi);
PicNmon = Nmonpic -> GetMean();

cout<<"Neutron Counts Nmon: "<<NeutronCountsN<<endl;
cout<<"Nmon peak 4,5 in: "<<pulserPosN<<endl;
cout<<"Nmon peak MEAN in: "<<PicNmon<<endl;
cout<<" "<<endl;
    //cout<<"Nmon peak in: "<<pulserPosN<<" with Neutron Counts: "<<NeutronCountsN<<endl;

}
}

// Find peak and integral Pulser Nmon

double deltaPulsernp=1000.0;

TSpectrum *snp = new TSpectrum(100);

int nfoundnp = snp->Search(Nmonpuls,10,"nobackground new",peakRatio);

TList *functionsnp = Nmonpuls->GetListOfFunctions();
TPolyMarker *pmnp = (TPolyMarker*)functionsnp->FindObject("TPolyMarker");
double* nppmarrayX=pmnp->GetX() ; // Find polymarkers position

double pulserPosNp, PulserCountsNp;

for (int j = 0; j < nfoundnp; j++) {
    pulserPosNp=nppmarrayX[j];
    if(pulserPosNp>=PulserLowLimit){
        TF1 *f1 = new TF1("f1","gaus",-5,.5);
        f1->SetParameters(1000.0, pulserPosNp, deltaPulsernp);
        Nmonpuls -> Fit("f1", "Q", "",pulserPosNp-deltaPulsernp,pulserPosNp+deltaPulsernp);
        double mean = f1->GetParameter(1);
        double sd = f1->GetParameter(2);
        double Peak_o_Np=mean-4.5*sd;
        double Peak_f_Np=mean+4.5*sd;

        int PeakBINo_Np= Nmonpuls->GetXaxis()->FindBin(Peak_o_Np);
        int PeakBINf_Np= Nmonpuls->GetXaxis()->FindBin(Peak_f_Np);

        PulserCountsNp = Nmonpuls->Integral(PeakBINo_Np,PeakBINf_Np);

        cout<<"Integral Pulse Nmon: "<< intenpu <<endl;
        cout<<"Pulser Counts Nmon 4,5: "<<PulserCountsNp<<endl;
        cout<<"Nmon Pulser peak 4,5 in: "<<pulserPosNp<<endl;
        cout<<" "<<endl;
        //cout<<"Nmon Pulser peak in: "<<pulserPosNp<<" with Pulser Counts: "<<PulserCountsNp<<endl;

    }
}

double nRateN;
nRateN=NeutronCountsN/PulserCountsNp;
cout<<"NMon NRate in: "<<nRateN<<endl;

// Find peak and integral Pulser

double deltaPulserp=250.0;

TSpectrum *sp = new TSpectrum(100);

int nfoundp = sp->Search(Pulser,10,"nobackground new",peakRatio);

```



```

TList *functionsp = Pulser->GetListOfFunctions();
TPolyMarker *pmp = (TPolyMarker*)functionsp->FindObject("TPolyMarker");
double* ppmarrayX=pmp->GetX(); // Find polymarkers position

double pulserPosP, PulserCountsP;

for (int j = 0; j < nfoundp; j++) {
    pulserPosP=ppmarrayX[j];
    if(pulserPosP>=PulserLowLimit){
        TF1 *f1 = new TF1("f1","gaus",-5,.5);
        f1->SetParameters(1000.0, pulserPosP, deltaPulserp);
        Pulser -> Fit("f1", "Q", "", pulserPosP-deltaPulserp,pulserPosP+deltaPulserp);
        double mean = f1->GetParameter(1);
        double sd = f1->GetParameter(2);
        double Peak_o_p=mean-4.5*sd;
        double Peak_f_p=mean+4.5*sd;

        int PeakBINo_p= Pulser->GetXaxis()->FindBin(Peak_o_p);
        int PeakBINf_p= Pulser->GetXaxis()->FindBin(Peak_f_p);

        PulserCountsP = Pulser->Integral(PeakBINo_p,PeakBINf_p);

        cout <<"Integral Pulser: "<< intep <<endl;
        cout<<"Pulser Counts 4,5: "<<PulserCountsP<<endl;
        cout<<"Pulser peak 4,5 in: "<<pulserPosP<<endl;
        cout<<" "<<endl;
        //cout<<"Pulser peak in: "<<pulserPosP<<" with Pulser Counts: "<<PulserCountsP<<endl;
    }
}

//Graficar
double fasp=1.8;

TCanvas * c1 = new TCanvas("c1","Graficas",500*fasp,400*fasp);
c1->Update();
c1->Divide(3,3,0.02,0.02);
c1->cd(1);

Amon->GetXaxis()->SetRangeUser(xmina,xmaxa);
Amon->Draw();

c1->cd(2);

Amonpic->GetXaxis()->SetRangeUser(xminapi,xmaxapi);
Amonpic->Draw();

c1->cd(3);

Amonpuls->GetXaxis()->SetRangeUser(xminapu,xmaxapu);
Amonpuls->Draw();

c1->cd(4);

Nmon->GetXaxis()->SetRangeUser(xminn,xmaxn);
Nmon->Draw();

c1->cd(5);

Nmonpic->GetXaxis()->SetRangeUser(xminnpi,xmaxnpi);
Nmonpic->Draw();

c1->cd(6);

```

```
Nmonpuls->GetXaxis()->SetRangeUser(xminnpu,xmaxnpu);  
Nmonpuls->Draw();
```

```
c1->cd(7);
```

```
Pulser->GetXaxis()->SetRangeUser(xminp,xmaxp);  
Pulser->Draw();
```

```
c1->cd(8);
```

```
Amoncal->GetXaxis()->SetRangeUser(100,900);  
Amoncal->Draw();
```

```
c1->cd(9);
```

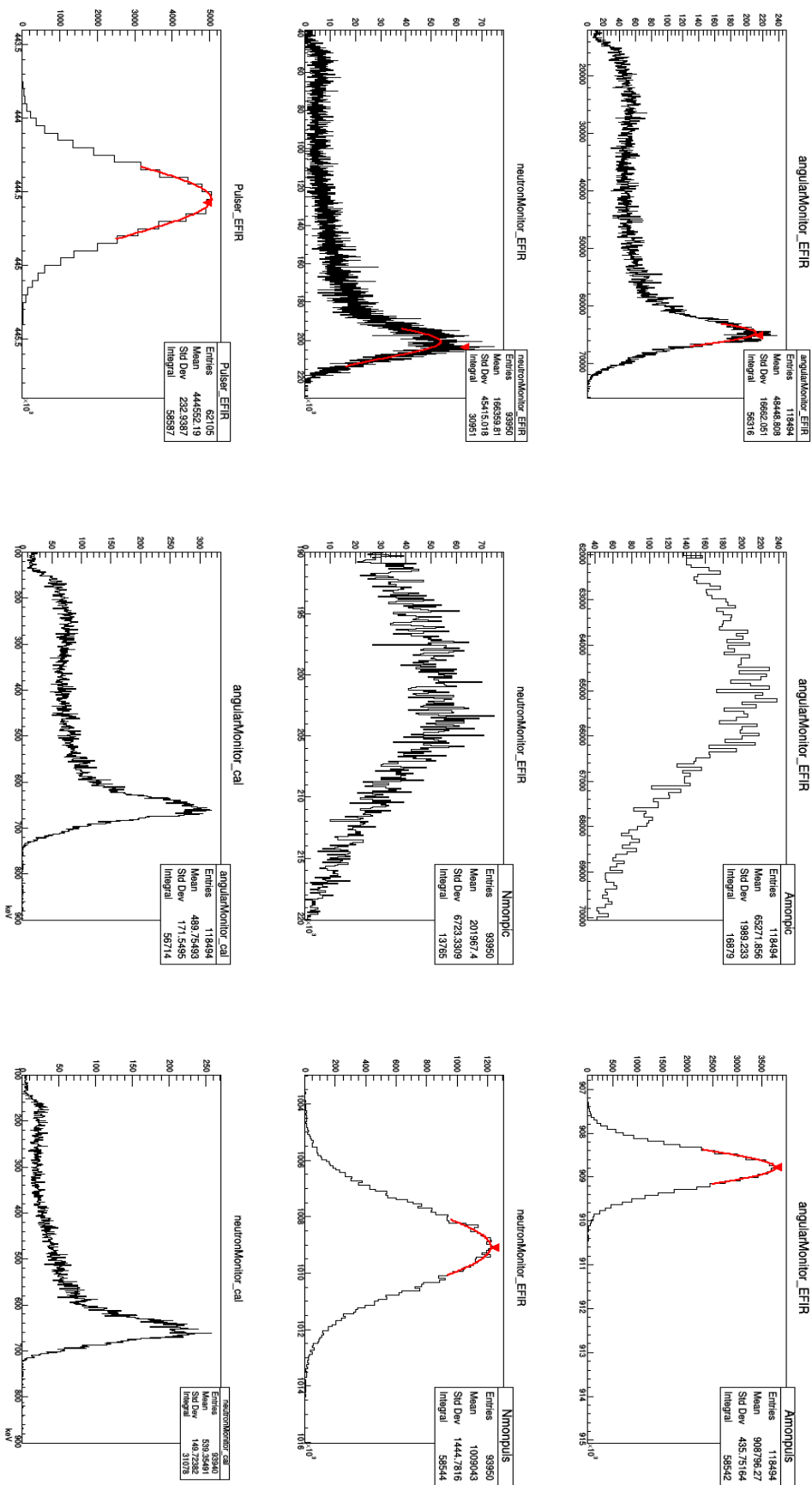
```
Nmoncal->GetXaxis()->SetRangeUser(100,900);  
Nmoncal->Draw();
```

```
c1->SaveAs((input+"_CANVAS.root").c_str());  
c1->WaitPrimitive();
```

```
gApplication->Terminate();
```

```
}
```

Anexo 5. Histogramas obtenidos a partir del script anterior



Anexo 6. Script obtención corriente experimental

```
void getCurrent1(){
ifstream in("corriente_7.txt");
ofstream out("test");
double c1, c2,c3,c4,c5,c6, sum=0.0, cont=0.0;
bool read=true;

while (read) {

    if(in>>c1>>c2>>c3>>c4>>c5>>c6){
if(c4>=8148 && c4<= 8508){
sum+=c5;
cont++;
out <<c5<<endl;
}

}else{read = false;}

}
cout<<"mean current (nA): "<< (sum/cont)/10.0<<endl;
cout<<"cont: "<<cont<<endl;
in.close();
out.close();

}
```

Anexo 7. Código LongCounter

- **Extracto del Brief usear manual:**

Description

A code for the simulation of long counters, i.e Helium-3 filled neutron detector moderated by High Density Polyethylene (HDPE). The is based on the Geant4-toolkit and runs under linux with geant4 installation version 10.0 (or higher). The long counter is arranged at room conditions:

$$T=293.6 \text{ K}, P=1 \text{ atm}$$

The HDPE in the moderator is set to a density

$$\text{HDPE_density} = 0.95 \text{ g/cm}^3$$

The code is fully compatible with the Geant4 messengers for visualization and running simulations, as well as, the G4GeneralParticleSource (GPS) macro commands for setting radiation sources and particle beams¹.

The neutron physics is defined up to 20 MeV, including High Precision libraries () and thermal treatment for neutron scattering.

For more information about the code see references².

Running the code

On the terminal:

```
$ longCounter FILE
```

FILE corresponds to the macro with the instruction for running the simulations in batch mode. If no FILE is provided, the code runs in graphic mode as shown in figure 1.

For running the code, a file:

```
input.tmp
```

must be provided with configuration of the ³He-tube, moderator and position. The code will seek for this inside the running directory.

¹See Geant4 documentation:: <http://geant4.cern.ch/support/userdocuments.shtml>

²-“Modelling moderated proportional neutron counters using the Geant4 toolkit and the application to detection of fast neutron burst”, A. Tarifeño-Saldivia et al. PoS(XLASNPA)068, 2013

-“Conceptual design of a hybrid neutron-gamma detector for study of β -delayed neutrons at the RIB facility of RIKEN”, A. Tarifeño-Saldivia et al. JINST 12 (2017) P04006.

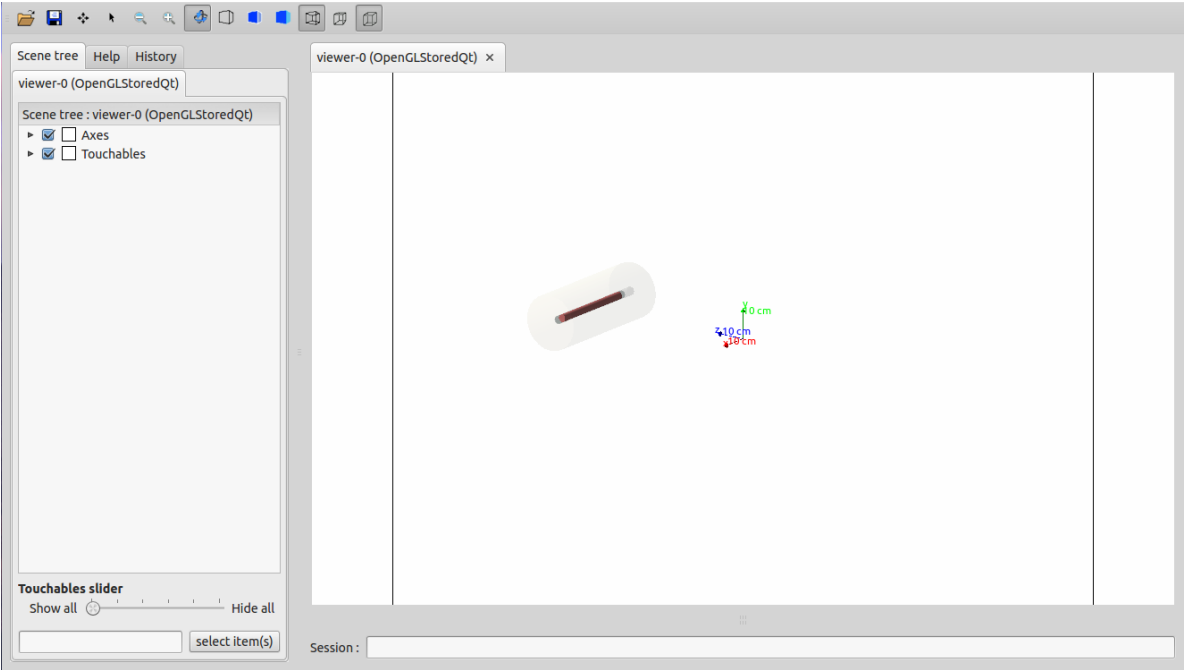


Figure A1. longCounter graphic interface.

Example input.tmp file

An example of the input.tmp file is provided in table 1. The lines after ### are reserved for commentaries and user information. These lines are not read by the code.

#FM	Xm/dm	Ym/Dm	Zm	rotY	rotZ				
1	0	10.03	32	0	0				
#FPM	Pxm	Pym	Pzm						
0	0	0	0						
#NoOfDetGroups									
1									
#N	Type	FC	RX0	RY0	Radius Z	StartD	DeltaD	Invert	
1	8	0	0	0	0	4.5	0	0	1
### Comments and useful information									

Table A2. Example of input.tmp file for a single 3He tube (type 8).

Anexo 8. Tablas Respuesta Amon y Nmon

- Amon:

Distancia (cm)	100			125			150			200			250			350		
	Energía (MeV)	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error
3		0.804	0.006	0.821	0.005	0.835	0.867	0.006	0.883	0.007	0.897	0.007	0.883	0.007	0.887	0.007	0.887	0.007
3.1		0.737	0.006	0.761	0.005	0.778	0.785	0.006	0.783	0.006	0.783	0.006	0.783	0.006	0.783	0.006	0.783	0.006
3.2		0.679	0.005	0.702	0.005	0.711	0.728	0.006	0.747	0.006	0.747	0.006	0.747	0.006	0.747	0.006	0.747	0.006
3.3		0.645	0.005	0.659	0.005	0.669	0.684	0.006	0.695	0.006	0.695	0.006	0.695	0.006	0.695	0.006	0.695	0.006
3.4		0.618	0.005	0.635	0.005	0.652	0.667	0.005	0.669	0.006	0.669	0.006	0.669	0.006	0.669	0.006	0.669	0.006
3.5		0.607	0.005	0.620	0.005	0.639	0.648	0.005	0.651	0.006	0.651	0.006	0.651	0.006	0.651	0.006	0.651	0.006
3.6		0.616	0.005	0.628	0.005	0.638	0.657	0.005	0.665	0.006	0.665	0.006	0.665	0.006	0.665	0.006	0.665	0.006
3.7		0.628	0.005	0.637	0.005	0.650	0.666	0.005	0.673	0.006	0.673	0.006	0.673	0.006	0.673	0.006	0.673	0.006
3.8		0.650	0.005	0.664	0.005	0.675	0.696	0.005	0.693	0.006	0.693	0.006	0.693	0.006	0.693	0.006	0.693	0.006
3.9		0.651	0.005	0.679	0.005	0.694	0.716	0.005	0.716	0.006	0.716	0.006	0.716	0.006	0.716	0.006	0.716	0.006
4		0.673	0.005	0.696	0.005	0.711	0.729	0.006	0.737	0.006	0.737	0.006	0.737	0.006	0.737	0.006	0.737	0.006
4.1		0.687	0.005	0.710	0.005	0.717	0.771	0.006	0.765	0.007	0.765	0.007	0.765	0.007	0.765	0.007	0.765	0.007
4.2		0.684	0.005	0.710	0.005	0.718	0.740	0.006	0.743	0.007	0.743	0.007	0.743	0.007	0.743	0.007	0.743	0.007
4.3		0.683	0.005	0.706	0.005	0.705	0.733	0.006	0.748	0.006	0.748	0.006	0.748	0.006	0.748	0.006	0.748	0.006
4.4		0.708	0.006	0.731	0.005	0.741	0.762	0.007	0.782	0.007	0.782	0.007	0.782	0.007	0.782	0.007	0.782	0.007
4.5		0.737	0.006	0.756	0.005	0.778	0.789	0.006	0.810	0.007	0.810	0.007	0.810	0.007	0.810	0.007	0.810	0.007
4.6		0.745	0.006	0.774	0.005	0.792	0.807	0.006	0.812	0.007	0.812	0.007	0.812	0.007	0.812	0.007	0.812	0.007
4.7		0.747	0.006	0.791	0.005	0.802	0.826	0.006	0.840	0.007	0.840	0.007	0.840	0.007	0.840	0.007	0.840	0.007
4.8		0.761	0.006	0.793	0.005	0.807	0.826	0.006	0.862	0.007	0.862	0.007	0.862	0.007	0.862	0.007	0.862	0.007
4.9		0.775	0.006	0.803	0.005	0.818	0.853	0.006	0.858	0.007	0.858	0.007	0.858	0.007	0.858	0.007	0.858	0.007
5		0.796	0.006	0.812	0.005	0.833	0.857	0.006	0.870	0.007	0.870	0.007	0.870	0.007	0.870	0.007	0.870	0.007

Distancia (cm)		100		150		225		300		350	
Energía (MeV)	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	Respuesta (cm ²)	error	
3	7,310	0,038	7,601	0,050	7,747	0,053	7,916	0,051	8,023	0,060	
3,1	6,902	0,037	7,230	0,049	7,412	0,052	7,483	0,049	7,545	0,058	
3,2	6,560	0,036	6,907	0,047	7,112	0,051	7,229	0,049	7,115	0,056	
3,3	6,386	0,035	6,603	0,046	6,821	0,050	6,888	0,047	6,967	0,056	
3,4	6,239	0,035	6,475	0,046	6,637	0,049	6,754	0,047	6,884	0,055	
3,5	6,188	0,035	6,356	0,046	6,577	0,049	6,670	0,047	6,669	0,054	
3,6	6,224	0,035	6,441	0,046	6,555	0,049	6,643	0,047	6,749	0,055	
3,7	6,264	0,035	6,463	0,046	6,771	0,050	6,826	0,047	6,820	0,055	
3,8	6,305	0,035	6,698	0,047	6,836	0,050	6,859	0,047	6,975	0,056	
3,9	6,468	0,035	6,766	0,047	6,963	0,051	6,986	0,048	7,014	0,056	
4	6,415	0,035	6,850	0,047	7,081	0,051	7,113	0,048	7,123	0,056	
4,1	6,673	0,036	6,976	0,048	7,036	0,051	7,150	0,048	7,115	0,056	
4,2	6,579	0,036	6,889	0,047	7,091	0,051	7,201	0,048	7,264	0,057	
4,3	6,759	0,036	7,003	0,048	7,280	0,052	7,388	0,049	7,471	0,058	
4,4	6,755	0,036	7,130	0,048	7,307	0,052	7,537	0,050	7,480	0,058	
4,5	6,901	0,037	7,347	0,049	7,432	0,052	7,573	0,050	7,730	0,059	
4,6	6,910	0,037	7,259	0,049	7,457	0,052	7,585	0,050	7,721	0,058	
4,7	6,980	0,037	7,269	0,049	7,577	0,053	7,686	0,050	7,788	0,059	
4,8	6,952	0,037	7,392	0,049	7,568	0,053	7,736	0,050	7,941	0,059	
4,9	6,988	0,037	7,358	0,049	7,527	0,053	7,722	0,050	7,851	0,059	
5	7,014	0,037	7,419	0,049	7,675	0,053	7,875	0,051	7,867	0,059	

Nmon:

-